



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Instrumentación y Control Automático)

**Diseño de pupilómetro, a nivel prototipo (basado en procesamiento de imágenes).**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

**Presenta:**

Francisco Miguel García Herrera

**Dirigido por:**

Jorge Domingo Mendiola Santibáñez

Jorge Domingo Mendiola Santibáñez

Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Danjela Ibrahimí

Secretaria

\_\_\_\_\_  
Firma

Juvenal Rodríguez Reséndiz

Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dra. Angélica Rosario Jiménez Sánchez

Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Damián Vargas Vázquez

Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Manuel Toledano Ayala

Director de la facultad

\_\_\_\_\_  
Dr. Juan Carlos Antonio Jáuregui Correa

Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

7 de noviembre de 2022

México



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Diseño de pupilómetro, a nivel prototipo (basado en  
procesamiento de imágenes).

**por**

Francisco Miguel García Herrera

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0  
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

**Clave RI:** IGMAC-300442

# “Diseño de pupilómetro, a nivel prototipo (basado en procesamiento de imágenes)”

por

Francisco Miguel García Herrera

## RESUMEN

El procesamiento de imágenes digitales (*Digital Image Processing* o *DIP*) es un conjunto de técnicas, filtros y transformaciones que brindan la posibilidad de trabajar con una imagen; es útil para adquirir (o modificar) información de ésta última para ser usada en estudios y aplicaciones diversas, como el entretenimiento, la información o, en el caso de este proyecto, la medicina.

Varias de estas técnicas proceden de la morfología matemática, lo que permite al investigador trabajar de la mano con algoritmos de origen matemático para tratar a la imagen e identificar en ella patrones que sean de su interés, en particular patrones irregulares y pequeños, como son granos de dimensiones microscópicas o elementos más perceptibles, como el ojo y la pupila.

Es así que el presente proyecto, haciendo uso del procesamiento de imágenes digitales, empleando diversas técnicas y filtros (como la introducción de la última apertura única) y transformaciones (destacándose el diseño de marcadores únicos) propias de la morfología matemática, consiste en la realización de un pupilómetro capaz de medir y clasificar las pupilas de diferentes pacientes (en distintas circunstancias) de forma automatizada, para su uso en el diagnóstico de enfermedades y análisis de la forma de las propias pupilas.

En concreto, se muestra el uso de algoritmos basados en el diámetro de Feret, el cual permite obtener tanto el área como el contorno de figuras irregulares por medio de promedios y estimaciones, así como de la reconstrucción de figuras gracias a estas últimas.

Por otro lado, también se emplea el operador matemático de la última apertura única, cuya utilidad recae en la recuperación de pérdidas en las estructuras de una imagen, así como en la separación de estas en un amplio espectro de niveles de gris, útil para la segmentación de imágenes de baja calidad.

Así mismo, se emplean tres técnicas de medición para las pupilas: el propio diámetro de Feret, el conteo de píxeles el cual depende de lo que puedan recuperar de la pupila los algoritmos de morfología matemática, y el del promedio del contorno (o perímetro), a partir de gradientes, con base en la figura obtenida por los algoritmos de morfología matemática.

**Palabras clave:** *pupilómetro, última apertura única, diámetro de Feret, gradiente morfológico, morfología matemática*

## ABSTRACT

Digital Image Processing (DIP) is a set of techniques, filters and transformations that provide the ability to work with images; it is useful to acquire (or modify) information from the latter in order to be used in studies and various applications such as entertainment, information or, in the case of this project, medicine.

Several of these techniques come from mathematical morphology, which allows the researcher to work hand in hand with algorithms of mathematical origin to treat the image and identify patterns in it that are of interest, particularly irregular and small patterns, such as grains of microscopic dimensions or more perceptible elements such as the eye and the pupil.

Thus, the present project, making use of DIP, employing various techniques and filters (such as the introduction of the last unique opening) and transformations (highlighting the design of unique markers) typical of mathematical morphology, consists of the realization of a pupillometer capable of measuring and classifying the pupils of different patients (in different circumstances) in an automated way, for use in the diagnosis of diseases and analysis of the shape of the pupils themselves.

Specifically, the use of algorithms based on Feret's diameter is shown, which allows obtaining both the area and the perimeter of irregular figures using averages and estimates, as well as the reconstruction of figures thanks to the latter.

On the other hand, the mathematical operator of the last unique opening is also used, whose utility lies in the recovery of losses in the structures of an image, as well as in the separation of these in a wide spectrum of gray levels, which useful for the poor quality image segmentation.

Likewise, three measurement techniques are used for the pupils: the Feret diameter itself, the pixel count which depends on what mathematical morphology algorithms can recover from the pupil, and the average contour (or perimeter) from gradients, based on the figure obtained by mathematical morphology algorithms. **Keywords:** *pupillometer, last unique opening, Feret's diameter, morphological gradient, mathematical morphology*

## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS**

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi madre Consuelo, a mi padre Juan Carlos, como fruto del ser humano que han moldeado con tanta paciencia y cariño.

Va para los estudiantes que sienten solos, confundidos y que no logran ver la luz: confíen, siempre habrá alguien dispuesto a ayudarlos, trayendo el Sol a sus vidas; y no olviden buscar en su interior: todos tenemos un núcleo valioso.

No busquen la perfección en su trabajo, aprecien la satisfacción que este les brinda.

### **Agradecimientos**

Al doctor Mendiola Santibáñez, mi asesor, que con su comprensión y conocimientos me ayudó a ver el proceso de aprendizaje e investigación desde un punto de vista más humano y eficiente: “el conocimiento de los libros no va a ninguna parte... el tiempo sí”.

A mi madre Consuelo que nunca se rindió conmigo a pesar de no ser “como las otras personas”, por soportar a mi lado todos los embates agresivos de la vida y por enseñarme a abrazar y a no temer a ser yo.

A mi padre Juan Carlos que, a pesar de la distancia, me dejó en claro que el pensar en mil cosas a la vez puede tener sus ventajas, siempre que no me olvide de mí mismo.

A mi hermano René de quien aprendí, un poco tarde, cómo ser un estudiante sin morir en el intento.

A mi hermano Armando que, con su ritmo acelerado y su presión, me enseñó a no bajar en el compromiso.

A mi hermano Carlos, por haberme demostrado que los cambios existen y se dan de a poco.

A mi hermano Juan quien me enseñó el significado de la lealtad.

Al doctor Juvenal por haberme abierto la mente a posibilidades de trabajo que no lograba ver en mi carrera de Electrónico.

A la doctora Danjela por enseñarme el valor del respeto por el tiempo ajeno y la utilidad de saber emplearlo.

A mis compañeros por dejarme en claro que las batallas no siempre se ganan solas y que la persona se hace por su manera de enfrentarlas y no por cuántas ha vencido.

Al doctor Jáuregui, por haberme hecho entender el verdadero significado de ser investigador.

Al doctor Valentín por contagiarme del ánimo por aprender.

A las secretarias que tuvieron la paciencia de explicarme las cosas hasta que las entendía. Siempre muy amables.

A los y las conserjes por contestarme siempre el saludo, eso alegraba mis días.

# Índice general

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Glosario</b>  | <b>15</b> |
| <b>2. Introducción</b>  | <b>16</b> |
| <b>3. Antecedentes</b>  | <b>20</b> |
| 3.1. Trabajos previos sobre la medición de las pupilas en la oftalmología . . . . . | 21        |
| 3.2. Trabajos previos sobre el procesamiento de imágenes . . . . .                  | 23        |
| <b>4. Justificación</b>   | <b>26</b> |
| <b>5. Formulación del problema</b>  | <b>28</b> |
| <b>6. Hipótesis</b>   | <b>31</b> |
| <b>7. Objetivos</b>   | <b>32</b> |
| 7.1. Objetivo principal . . . . .   | 32        |
| 7.2. Objetivos específicos . . . . .  | 32        |
| 7.3. Alcance . . . . .  | 32        |
| <b>8. Marco teórico</b>   | <b>34</b> |
| 8.1. Morfología del ojo . . . . .   | 34        |
| 8.1.1. La pupila . . . . .  | 36        |
| 8.1.2. Anomalías en la pupila . . . . .   | 37        |



|   |           |
|---|-----------|
| 8.1.3. Medidas e índices normalizados de la pupila . . . . .          | 39        |
| 8.2. Instrumentos de oftalmología para la medición de la pupila . . . | 40        |
| 8.2.1. Medidor de pupila . . . . .                                    | 40        |
| 8.2.2. Pupilómetros . . . . .   | 41        |
| 8.2.3. Mercado de los pupilómetros . . . . .                          | 42        |
| 8.3. Conceptos para la estimación de la pupila . . . . .              | 48        |
| 8.3.1. Diámetro de Feret . . . . .                                    | 48        |
| 8.3.2. Pupila patrón (PP) e índices normalizados . . . . .            | 49        |
| 8.4. Procesamiento de Imágenes . . . . .                              | 50        |
| 8.5. Morfología matemática . . . . .                                  | 51        |
| 8.5.1. Elemento estructurante . . . . .                               | 51        |
| 8.5.2. Dilatación . . . . .   | 52        |
| 8.5.3. Erosión . . . . .  | 53        |
| 8.5.4. Segmentación . . . . .   | 54        |
| 8.5.5. La última apertura . . . . .                                   | 56        |
| 8.5.6. Transformaciones geodésicas . . . . .                          | 58        |
| 8.5.7. Gradiente morfológico . . . . .                                | 59        |
| <b>9. Métodos</b>   | <b>61</b> |
| 9.1. Recursos materiales . . . . .                                    | 61        |
| 9.2. <i>MATLAB</i> . . . . .  | 62        |
| 9.3. Plataforma de captura de imágenes . . . . .                      | 64        |
| 9.4. Participantes . . . . .  | 67        |
| 9.5. Consideraciones éticas . . . . .                                 | 67        |
| 9.6. Consideraciones clínicas . . . . .                               | 68        |
| 9.6.1. Procedimiento de adquisición de imágenes . . . . .             | 69        |
| 9.6.2. Consideraciones clínicas . . . . .                             | 71        |
| 9.7. Modelado del proceso . . . . .                                   | 72        |
| 9.8. Modelado del procesamiento de imágenes . . . . .                 | 76        |
| 9.9. Proceso de segmentación de los ojos . . . . .                    | 77        |

|   |            |
|---|------------|
| 9.10. Proceso de medición                                     | 83         |
| 9.10.1. Conteo de píxeles                                     | 83         |
| 9.10.2. Algoritmo de diámetro de Feret                        | 83         |
| 9.10.3. Medición del área de la pupila a partir del perímetro | 86         |
| <b>10. Resultados</b>   | <b>88</b>  |
| 10.1. Caso 1: pupilas completas                               | 88         |
| 10.1.1. Recuperación de las pupilas                           | 89         |
| 10.1.2. Medición de las pupilas                               | 93         |
| 10.2. Caso 2: pupilas grandes                                 | 101        |
| 10.2.1. Recuperación de las pupilas                           | 102        |
| 10.2.2. Medición de las pupilas                               | 105        |
| 10.3. Caso 3: pupila destruida por reflejo de luz infrarroja  | 113        |
| 10.3.1. Recuperación de las pupilas                           | 114        |
| 10.3.2. Medición de las pupilas                               | 118        |
| 10.4. Caso 4: pupila destruida por un defecto cutáneo         | 124        |
| 10.4.1. Recuperación de las pupilas                           | 125        |
| 10.4.2. Medición de las pupilas                               | 128        |
| 10.5. Caso 5: pupila insalvable                               | 136        |
| 10.5.1. Recuperación de las pupilas                           | 137        |
| 10.6. Análisis general  | 140        |
| 10.6.1. Procedimiento de conversión de píxeles a milímetros   | 141        |
| 10.6.2. Medidas obtenidas de la base de datos                 | 143        |
| 10.7. Índices normalizados de las pupilas                     | 145        |
| 10.8. Aplicaciones y productos generados                      | 147        |
| 10.8.1. Aplicaciones:   | 147        |
| 10.8.2. Productos derivados:                                  | 148        |
| <b>11. Conclusiones</b>                                       | <b>149</b> |
| 11.1. Conclusiones  | 149        |
| 11.2. Trabajo futuro  | 154        |

# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| 8.1. Partes del ojo [1]  | 35 |
| 8.2. Vía parasimpática (izquierda) y vía simpática (derecha) [2]                                       | 37 |
| 8.3. Medidor de pupilas [3]  | 40 |
| 8.4. Esquema de un pupilómetro [4]   | 42 |
| 8.5. Ejemplos de medidores análogos.   | 44 |
| 8.6. Ejemplos de medidores digitales.  | 47 |
| 8.7. Ejemplificación del diámetro de Feret [4].  | 48 |
| 8.8. Ejemplos de elementos estructurantes bidimensionales  | 52 |
| 9.1. Esquema del armado de la cámara.  | 64 |
| 9.2. Proceso a seguir por parte del pupilómetro.   | 74 |
| 9.3. Selección de imágenes.  | 75 |
| 9.4. Diagrama base del DIP.  | 76 |
| 9.5. Preprocesamiento de imágenes.   | 78 |
| 9.6. Residuos de la última apertura única.   | 79 |
| 9.7. Remanente de la última imagen, perteneciente al primer pico.                                      | 79 |
| 9.8. Ejemplificación de la elaboración de un marcador.   | 80 |
| 9.9. Contribución de los discos en términos de granulometría.  | 81 |
| 9.10. Relleno de las pupilas.  | 82 |
| 9.11. Resultados de aplicar dilataciones y erosiones sucesivas.  | 82 |
| 9.12. Detección de diámetros.  | 84 |
| 10.1. Imagen del primer caso y el resultado del pre-procesamiento,<br>acompañadas por sus histogramas. | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| 10.2. Efectos de la última apertura única, en el primer caso.  | 90  |
| 10.3. Segmentación de las pupilas del primer caso.   | 90  |
| 10.4. Creación de la máscara para el rescate de pupilas, en el primer caso.                                      | 91  |
| 10.5. Resultado de la obtención de las pupilas en el caso 1.   | 93  |
| 10.6. Diámetros de Feret marcados en el caso 1.  | 93  |
| 10.7. Medidas de ambas pupilas en el Caso 1.   | 97  |
| 10.8. Concepto trigonométrico del círculo.   | 98  |
| 10.9. Superposición de las pupilas reconstruidas por Feret, en la imagen original del Caso 1.                    | 99  |
| 10.10 Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen original del Caso 1.      | 99  |
| 10.11 Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen pre-procesada del Caso 1. | 100 |
| 10.12 Diámetros de Feret marcados en el caso 1.  | 100 |
| 10.13 Imágenes del segundo caso y del resultado del pre-procesamiento, acompañadas por sus histogramas.          | 101 |
| 10.14 Efectos de la última apertura única, en el segundo caso.   | 102 |
| 10.15 Segmentación de las pupilas del segundo caso.  | 103 |
| 10.16 Creación de la máscara para el rescate de pupilas, en el segundo caso.                                     | 104 |
| 10.17 Resultado de la obtención de las pupilas en el caso 2.   | 105 |
| 10.18 Diámetros de Feret marcados en el caso 2.  | 105 |
| 10.19 Medidas de ambas pupilas en el Caso 2.   | 110 |
| 10.20 Superposición de las pupilas reconstruidas por Feret, en la imagen original del Caso 2.                    | 111 |
| 10.21 Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen original del Caso 2.      | 111 |
| 10.22 Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen pre-procesada del Caso 2. | 112 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 10.23 | Diámetros de Feret marcados en el caso 2.   | 112 |
| 10.24 | Imágenes del tercer caso y del resultado del pre-procesamiento,<br>acompañadas por sus histogramas.             | 113 |
| 10.25 | Efectos de la última apertura única, en el tercer caso.   | 114 |
| 10.26 | Segmentación de las pupilas del tercer caso.  | 115 |
| 10.27 | Creación de la máscara para el rescate de pupilas, en el tercer<br>caso.  | 116 |
| 10.28 | Algoritmo de relleno especial.  | 117 |
| 10.29 | Resultado de la obtención de las pupilas en el caso 3.  | 117 |
| 10.30 | Diámetros de Feret marcados en el caso 3.   | 118 |
| 10.31 | Medidas de ambas pupilas en el Caso 3.  | 121 |
| 10.32 | Superposición de las pupilas reconstruidas por Feret, en la<br>imagen original del Caso 3.                      | 122 |
| 10.33 | Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo pro-<br>puesto, en la imagen original del Caso 3.      | 122 |
| 10.34 | Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo pro-<br>puesto, en la imagen pre-procesada del Caso 3. | 123 |
| 10.35 | Diámetros de Feret marcados en el caso 3.   | 123 |
| 10.36 | Imágenes del cuarto caso y del resultado del pre-procesamiento,<br>acompañadas por sus histogramas.             | 124 |
| 10.37 | Efectos de la última apertura única, en el cuarto caso.   | 125 |
| 10.38 | Segmentación de las pupilas del cuarto caso.  | 126 |
| 10.39 | Creación de la máscara para el rescate de pupilas, en el cuarto<br>caso.  | 127 |
| 10.40 | Resultado de la obtención de las pupilas en el caso 4.  | 128 |
| 10.41 | Diámetros de Feret marcados en el caso 4.   | 129 |
| 10.42 | Medidas de ambas pupilas en el Caso 4.  | 133 |
| 10.43 | Superposición de las pupilas reconstruidas por Feret, en la<br>imagen original del Caso 4.                      | 134 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 10.44 | Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen original del Caso 3.      | 134 |
| 10.45 | Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen pre-procesada del Caso 4. | 135 |
| 10.46 | Diámetros de Feret marcados en el caso 4.  | 135 |
| 10.47 | Imágenes del quinto caso y del resultado del pre-procesamiento, acompañadas por sus histogramas.           | 136 |
| 10.48 | Efectos de la última apertura única, en el quinto caso.  | 137 |
| 10.49 | Segmentación de las pupilas del quinto caso.   | 138 |
| 10.50 | Creación de la máscara para el rescate de pupilas, en el quinto caso.                                      | 139 |
| 10.51 | Resultado de la obtención de las pupilas en el caso 5.   | 140 |
| 10.52 | Red de calibración para la conversión de píxeles a milímetros.   | 141 |

# Índice de cuadros

|   |     |
|---|-----|
| 3.1. Trabajos previos sobre las pupilas (oftalmología).                         | 21  |
| 3.2. Trabajos previos sobre procesamiento de imágenes.                          | 23  |
| 9.1. Lista de precios de la plataforma experimental                             | 66  |
| 10.1. Medidas de los diámetros en el caso 1                                     | 95  |
| 10.2. Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 1 (pila izquierda) | 96  |
| 10.3. Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 1 (pila derecha)   | 96  |
| 10.4. Medidas de los diámetros en el caso 2                                     | 106 |
| 10.5. Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 2 (pila izquierda) | 107 |
| 10.6. Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 2 (pila derecha)   | 108 |
| 10.7. Medidas de los diámetros en el caso 3                                     | 119 |
| 10.8. Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 3 (pila izquierda) | 119 |
| 10.9. Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 3 (pila derecha)   | 120 |
| 10.10 Medidas de los diámetros en el caso 4                                     | 130 |
| 10.11 Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 4 (pila izquierda) | 131 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 10.12 | Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 4 (pu-<br>pila derecha) | 131 |
| 10.13 | Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en milímetros                      | 144 |
| 10.14 | Índices normalizados de las pupilas  | 146 |



# Capítulo 1

## Glosario

- AAO: Academia Americana de Oftalmología (por sus siglas en inglés).
- CD: corriente directa.
- CPU: unidad central de procesos (por sus siglas en inglés).
- DIP: procesamiento de imágenes digitales (por sus siglas en inglés).
- DSP: procesador de señales digitales (por sus siglas en inglés).
- FPGA: arreglo de compuertas lógicas programables en campo (por sus siglas en inglés).
- lux: medida empleada para la medición de la intensidad luminosa.
- Mp: *Megapíxel*, un millón de píxeles.
- p: píxel, superficie homogénea más pequeña de las que componen una imagen.
- PC: computadora personal (por sus siglas en inglés).
- RAM: memoria de acceso aleatorio (por sus siglas en inglés).
- ROM: memoria de sólo lectura (por sus siglas en inglés).
- TNP: parálisis del tercer par craneal (por sus siglas en inglés).

# Capítulo 2

## Introducción

Las primeras exploraciones del procesamiento de imágenes (DIP, por sus siglas en inglés) tuvieron su origen en la década de los veinte [5], momento en la se buscaba el almacenaje y la manipulación de fotografías, para poder transmitir las mediante cables y mejorar así, los tiempos que tardaban en enviarse éstas hacia distintas partes del mundo, con la finalidad de ser usadas en los periódicos.

Sin embargo, la formalización como tal, inició en la década de los sesenta para las transmisiones satelitales, con el fin de emplearse para la televisión. Fue entonces cuando entró el uso de la morfología matemática (MM, definida como la teoría para el análisis de estructuras espaciales con el objeto de analizar la forma y contorno de un objeto), en concreto, para el análisis de imágenes [6], de tal forma que se pudiesen generar algoritmos matemáticos que ahorraran tiempo en dicha actividad.

Pronto se le encontraron aplicaciones a dicho conjunto de técnicas para la corrección de imágenes, principalmente en cine y televisión, introduciendo conceptos como el de granulometría.

A la par que se profundizaba en esta área, se avanzó en el desarrollo de dispositivos especializados (como cámaras digitales) y en la creación de algoritmos, por lo que era inminente su implementación en computadoras.

A partir de la combinación directa del procesamiento de imágenes y de

computadoras (aunado al auge que éstas tenían, y tienen, entre centros de investigación y universidades) se dispararon aún más las aplicaciones: se llegó a la edición de imágenes para solventar algunas situaciones que parecían imposibles (como reunir a dos personas físicamente separadas); se avanzó hasta el punto en que fue posible la generación de imágenes por computadora (o *Computer Generated Imagery, CGI*) que permitieran desarrollar simulaciones o bien entretenimiento [5].

Era lógico pensar que estos desarrollos se expandirían, acompañando a la tecnología, en aspectos como la visión por computadora (útil en inteligencia artificial y la robótica) de ahí se expandió la aplicación a distintas ramas, como la medicina.

En el ámbito médico ha permitido obtener imágenes sobre padecimientos y detectar anomalías, que en su momento fueron desconocidas para gran parte del personal médico en el mundo, sobre cualquier parte del cuerpo, sin necesidad de ser invasivas sobre el paciente ni generar efectos secundarios. Así, se aplica el procesamiento de imágenes para diagnosticar lesiones o hemorragias en órganos de distintos sistemas como el nervioso, mediante resonancias magnéticas.

De los especialistas que se dedican al estudio de este sistema, son los oftalmólogos algunos de los que se han beneficiado de estos avances, pues es a través de la observación de los ojos y sus elementos (pupila, iris, córnea, principalmente) que estudian a dicho sistema al estar conectados éstos últimos (e inervados) por los sistemas nerviosos simpáticos y parasimpáticos, encargándose éstos de actividades como controlar el tamaño de la pupila (por acción de dos músculos, el esfínter del iris y el músculo ciliar), o la dirección de los mismos, (gracias a los nervios extraoculares), incluso acciones como el movimiento del párpado (principalmente por medio del nervio oculomotor o tercer par craneal) [2]. De aquí la importancia de poder tener observaciones y mediciones precisas.

El procesamiento de imágenes ha sido usado como herramienta para diagnósti-

co en la oftalmología: se sustenta en su integración con pupilómetros (instrumentos para la medición de pupilas) para poder observar y confirmar la existencia o ausencia de reactividad en las pupilas, la velocidad de tal acción o bien, el movimiento del propio ojo. [7] [8]

Este análisis ha permitido analizar y comprender condiciones como el desprendimiento de retina, el estrabismo (desviación e incapacidad de mover un ojo o ambos [9]), el astigmatismo (curvatura anormal en la córnea) y la anisocoria (diferencia de tamaño entre las pupilas sin reacción distinguible de éstas a la luz [10] [2]) [11] [12].

La preocupación por tales padecimientos ha llevado incluso a dar pasos sobre el desarrollo de terapias efectivas que ayuden a solucionarlos o, por lo menos, a mitigar sus efectos (como la fototerapia [13]).

El que estén comenzando con avances sobre las terapias, no quiere decir que la etapa de diagnóstico haya quedado solventada, de hecho, en este campo existe mucho margen de mejora, puesto que la morfología matemática también se ha expandido; en este entendido, no se puede dar por sentado que un diagnóstico sea mejor que otro si no se han probado todas las técnicas, ni siquiera se puede hablar de confiabilidad total. Técnicas como el diámetro de Feret (esencial para medir superficies o áreas de figuras irregulares a partir de la estimación y promediación de distintos diámetros, sin un contorno definido [14]) aún tienen mucho que ofrecer con distintas variantes que proponen algunos investigadores como [4], otros más han optado por proponer índices personalizados para el estudio del ojo [15] [16]. El espectro se ve ampliado si se considera, hablando solo del ojo, que el análisis de imágenes puede ser aplicado sobre distintas zonas, como la retina, el iris y la pupila, analizando los efectos de distintos comportamientos del ser humano o condiciones de luz a las que éste se expone y puede tolerar, por medio de las alteraciones percibidas en estos elementos [17] [10] [18].

En medio de tantos estudios que se han citado en párrafos anteriores y otros más no incluidos, enfocados en la parte cualitativa del estudio de los ojos, en

particular de las pupilas, es comprensible que se dejen de lado cuestiones primordiales como el estandarizar medidas o siquiera el garantizar que un estudio esté entregando resultados tangibles y tajantes, y no sólo convenientes para fomentar algunas patentes [19].

La baja incursión de la ingeniería en la rama de la oftalmología también representa otro obstáculo [20] [21], testimonio de ello es que falta la automatización en aspectos clave como el análisis de datos, pues algunos investigadores siguen echando mano de hojas de cálculo, procesadores de textos e, incluso, de medición manual, a pesar de emplear programas especializados como *ImageJ*. [4] [15] [7]

Bajo este supuesto, se pretende diseñar un pupilómetro a modo de investigación explorativa, a base de un algoritmo de procesamiento de imágenes en un sistema embebido; encargado de obtener el perímetro de las pupilas de cualquier paciente, de tal modo que pueda adaptarse como equipo médico para el diagnóstico de padecimientos relacionados con la vista.

# Capítulo 3

## Antecedentes

Los trabajos que se presentan en esta sección están enfocados a las herramientas de morfología matemática que se utilizan a lo largo del desarrollo de este trabajo con el objetivo de brindar un panorama sobre las actividades realizadas, así como a estado del arte referente a la oftalmología, lo que permite plantear posibles resultados que se van a obtener.

### 3.1. Trabajos previos sobre la medición de las pupilas en la oftalmología

Cuadro 3.1: Trabajos previos sobre las pupilas (oftalmología).

| Año  | Autor                  | Título   | Descripción  |
|------|------------------------|--|--|
| 2017 | Sonia Gholami et al.   | <i>The significance of changes in pupil size during stray-light measurement and with varying environmental illuminance</i>                       | <p>En cuanto a la medición del diámetro de las pupilas, se usó una webcam con resolución de 640x480, además de unas luces LED infrarrojas para mejorar la calidad de imagen en condiciones de baja luminosidad.</p> <p>Se midieron los diámetros de las pupilas por una regla calibrada, mediante la imagen capturada por la cámara web mostrada en la pantalla de la computadora. La medida fue facilitada al hacer uso de autoCAD. Se presumen sensibilidades de mediciones de 0.01mm.</p> <p>Estimaron un promedio del diámetro de 6.4mm en casi oscuridad total (4 lux), uno de 5.8mm, otro de 5.7mm, para dos sujetos a 40lux, y unos promedios de 4.4mm y 4.3mm a 400 lux, con una desviación estándar de 1, 0.9 y 0.8, para los tres niveles, respectivamente. [17]</p> |
| 2016 | James Q. Truong et al. | <i>Quantifying pupillary asymmetry through objective binocular pupillometry in the normal and mild traumatic brain injury (mTBI) populations</i> | <p>Hace referencia al estado actual del uso de los pupilómetros, desde el punto de vista de un médico. Establece el diagnóstico de anisocoria en una diferencia de 0.4 mm entre pupilas.</p> <p>Utiliza el pupilómetro Neuroptics DP-2000 y narra su composición, mencionando una resolución de 0.05 mm (como indica la hoja de datos). Lo que se mide de la pupila son el diámetro base y la amplitud dinámica de la constricción. Todo es evaluado en Excel.</p> <p>Las condiciones de luz las maneja entre 4 lux y 251 lux. [7]</p>   |

|      |                              |  |  |
|------|------------------------------|--|--|
| 2015 | Deb Kumar Mojumder et al.    | <i>Pupil to limbus ratio: Introducing a simple objective measure using two-box method for measuring early anisocoria and progress of pupillary change in the ICU</i> | <p>Se habla de que se utilizó la cámara de un Iphone 4s; con pruebas en un cuarto con iluminación medida y mantenida constante.</p> <p>Se les cuestionó a 21 miembros del personal médico sobre sus diagnósticos de la examinación pupilar; se determinó que muy pocos de los participantes podían estimar el tamaño de la pupila en la oscuridad y en luz brillante, en un 14% y 10%, pero ninguno fue simultáneamente preciso lo que indica que la evaluación subjetiva es poco confiable. Se usó PowerPoint para el análisis de imágenes porque estaba disponible de manera inmediata. [15]</p>         |
| 2015 | Tarek A. Shazly et al.       | <i>A simple infrared-augmented digital photography technique for detection of pupillary abnormalities</i>  | <p>Usan los 850nm porque estimula mínimamente a la pupila, manteniéndose visible para el uso de la cámara digital. La luz infrarroja permite capturar varias imágenes de la pupila en distintas condiciones luminosas, pues aumenta el contraste entre el iris y la pupila.</p> <p>Comentan que usaron ImageJ para medir el diámetro de las pupilas.</p> <p>Algunas cámaras que soportan la visión nocturna tienen filtros para la luz infrarroja, no obstante, estos filtros no bloquean completamente toda la luz cercana al infrarrojo (en el rango entre 800nm y 900nm, aunque sí la atenúan. [22]</p> |
| 2014 | Christopher L. Kramer et al. | <i>Neurologist versus machine: is the pupillometer better than the naked eye in detecting pupillary reactivity</i>   | <p>Se tenía una medida de 5mm en las pupilas y fueron inactivamente reactivas a la luz.</p> <p>Emplearon un pupilómetro denominado <i>NeuroOptics NPi 100</i>, para evaluar la reactividad de las pupilas. Cuando se realizó una examinación manual por parte de un neurorintensivista, con ayuda de una lámpara en una habitación oscura, la pupila derecha se contrajo lentamente desde los 6 hasta los 5mm en un lapso entre 7 a 9s con estimulación continua de luz.</p> <p>[23]</p>   |



|      |                             |  |   |
|------|-----------------------------|--|---|
| 2013 | Jillian Silbert et al.      | <i>Pupil size and anisocoria in children measured by the plusoptiX photoscreener</i> | <p>Estimaron que las medidas estándar para niños de menos de un año son de 5mm. De los niños mayores o iguales a 16 años promediaron 6.1mm.</p> <p>Funciona a una distancia de 1 metro del paciente, siendo menos invasivo para los niños, respecto a instrumentos que trabajan cerca de la cara. Se fija la resolución de modo que cada píxel represente 0.16mm. La distancia focal se establece en 1m, pero se toman fotografías entre 95cm y 105 cm del paciente.</p> <p>Dice que el tamaño promedio para el ojo derecho fue de <math>5.75 \pm 0.96mm</math> y <math>5.76 \pm 0.95mm</math> para el izquierdo, diferencia considerada no significativa. [19]</p> |
| 2012 | Caroline A Schneider et al. | <i>NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis</i>                               | <p>Presenta una reseña sobre el programa de ImageJ en el que se indica que ha habido hasta 20,000 artículos basados en su uso. Incluso se ha utilizado en el trabajo de Martín Gallegos Duarte et al. Esto para familiarizarse con la manera en que trabaja y su implementación con MATLAB en lo que es el análisis de imágenes mediante píxeles. [24]</p>  |

### 3.2. Trabajos previos sobre el procesamiento de imágenes

Cuadro 3.2: Trabajos previos sobre procesamiento de imágenes.

| Año  | Autor                         | Título   | Descripción   |
|------|-------------------------------|--|---|
| 2020 | Martín Gallegos Duarte et al. | <i>A Novel Method for Measuring Subtle Alterations in Pupil Size in Children with Strabismus</i> | <p>Se propuso un nuevo concepto, el de Pupila Patrón, para la medición del tamaño de pupilas con el objetivo de detectar estrabismo, mediante Morfología Matemática, centrándose en el concepto del diámetro de Feret. Con ello, se puede dar un diagnóstico sobre el padecimiento, sin importar el tamaño de las pupilas del paciente. [4]</p> |

|      |                            |  |  |
|------|----------------------------|--|--|
| 2019 | Carlos Paredes Orta et al. | <i>Method for grain size determination in carbon steels based on the ultimate opening</i>                  | Se propuso, como aplicación para granulometría, una variante del operador de la última apertura, para poder trabajar con imágenes de baja resolución, de modo que se compensen defectos en la iluminación o en la exposición de la imagen. [25]  |
| 2014 | Juan Angel Ramírez Núñez   | <i>Sensor Inteligente basado en FPGA para la cuantificación de distribuciones espaciales entre objetos</i> | Busca separar la implementación de un algoritmo, basado en operadores morfológicos de una computadora personal (PC, por sus siglas en inglés), al dejar dicha tarea en manos de un sistema embebido (una FPGA), para la medición del tamaño de nódulos en imágenes metalográficas, pues tales cálculos requieren de un tiempo de ejecución alto. [26].   |
| 2014 | Paul J. F. White et al.    | <i>Algorithms for Smartphone and Tablet Image Analysis for Healthcare Applications</i>                     | Utiliza algoritmos para el análisis de imágenes basándose en una aplicación móvil conocida como mHealth.<br>Aborda sobre algoritmos de análisis de imágenes que facilitan mediciones sin contacto de imágenes de formas irregulares.<br>Su aplicación es para analizar heridas a distancias de 30cm, donde las mediciones tuviesen menos de 10 % de error.<br>Se realiza computación de la profundidad mediante los datos del autoenfoco. Propone un método de conversión de píxeles a distancia.<br>Utiliza un objeto de referencia en la fotografía para corroborar los resultados. [27] |

|      |  |  |  |
|------|--|--|--|
| 2013 | John Kennedy Schettino de Souza et al. | <p><i>An open-source, FireWire camera-based, Labview-controlled image acquisition system for automated, dynamic pupillometry and blink detection</i></p> | <p>El Sistema de adquisición de datos está basado en unos <i>goggles</i> y un sistema embebido incrustado en él. Utiliza un módulo de conversión píxel a métrico.</p> <p>Utilizan el tratamiento del ruido de la imagen, así como la delimitación de la región de interés para la segmentación de las pupilas.</p> <p>Por medio del centroide obtiene la superficie de la pupila, mediante la selección de hasta doce puntos concéntricos.</p> <p>No reconstruye la pupila para la medición.</p> <p>Incluye una tabla de referencia sobre el uso de recursos. [28]</p> |
| 2008 | Edgar Alejandro Rivas Araiza           | <p><i>Análisis multiescala morfológico y compensación en iluminación en imágenes digitales</i></p>   | <p>Presenta el desarrollo y la caracterización de herramientas de procesamiento de imágenes. Utiliza transformaciones de apertura y cerradura por reconstrucción para el análisis en el espacio de escala, demostrando una mayor inmunidad al ruido al momento de tratar imágenes; además, establece un operador de contraste que normaliza niveles de grises en imágenes con mala iluminación. [29]</p>   |

# Capítulo 4

## Justificación

Desde antes de inicios del milenio ya se había comenzado a trabajar con los pupilómetros [30]. Son varias las mejoras que se han realizado en los dispositivos que van desde integrar todo el proceso en un único dispositivo, hasta emplear inteligencia artificial para la medición [31].

Se han hecho apenas esfuerzos en garantizar la precisión de éstas herramientas y compararlas con los métodos tradicionales [16]; existe incertidumbre sobre la estandarización de las medidas de las pupilas [7], debido a la morfología de éstas y el cómo varía incluso entre personas de la misma edad y género [32], o bien, dadas las condiciones luminosas en las que se obtienen las imágenes, así como el equipo utilizado; si el pupilómetro es comercial o si se utiliza la experiencia y observación del especialista.

El utilizar procesamiento de imágenes suele ser complicado, pues, en el caso de las pupilas, se realizan los cálculos sobre figuras irregulares que varían dependiendo de factores como la resolución o el movimiento de la propia imagen y las condiciones lumínicas, entre otras. Dentro de este ámbito, se han propuesto algunos métodos como el obtener promedios de ambas pupilas [4] para generar una medida estándar en cada paciente [17] [7]; también se ha echado mano para ayudar a la mejora de imágenes de baja resolución [29] [25].

El conocer el comportamiento y generar una buena definición de un ele-

mento tan delicado como el ojo, permite dar diagnósticos sobre enfermedades graves o alertar sobre anomalías en un sistema tan importante como el nervioso. [2] [33]

El presente proyecto busca brindar una exactitud en la medida del perímetro de las pupilas, entendiendo a éste como el contorno de las mismas, así como su superficie, sin importar la edad, género e independientemente de si éste muestra algún padecimiento, de tal forma que se pueda crear un algoritmo adaptativo capaz de mejorar la medición de las pupilas, mediante procesamiento de imágenes; que, además, se pueda extrapolar su uso, con facilidad, al diagnóstico de padecimientos de especial interés para la oftalmología, debido a que la medición es una actividad complicada derivado de los cambios sutiles tanto en el área como en el perímetro de una pupila, pues involucran factores como variaciones en la iluminación, el estado del paciente (de acuerdo a sus emociones [21]), la velocidad de reacción de las pupilas [20] e inflamaciones o daños en músculos como el dilatador y constrictor e incluso en problemas más graves como tumores. [2]

## Capítulo 5

### Formulación del problema

Una de las consideraciones que más afectan a la medición de las pupilas es la discrepancia que muestran los equipos de medición respecto a los estándares universalmente aceptados en sus medidas (considerando a éstas como el perímetro y el área, primordialmente) [32]; esto se debe a varios factores como que algunos autores, al registrar patentes de sus dispositivos, se niegan a compartir sus índices o siquiera a corroborarlos con los datos ya existentes [19], incluso hay quienes limitan el empleo de sus metodologías a un solo caso de estudio [23].

Dicha situación representa un problema de distorsión en las medidas, la cual puede llevar a diagnósticos erróneos en padecimientos como el estrabismo o la anisocoria, puesto que ésta, por ejemplo, se diagnostica si existe una diferencia de  $0.4 \text{ mm}$  entre ambas pupilas [7], pero es difícil realizar el diagnóstico si ambas pupilas poseen en el mismo padecimiento, es decir, ambas pupilas son de tamaño anormal o si el autor prefiere definir otra medida como la diferencia a partir de la cual se considera que existe el padecimiento.

Si esto se expande a otras enfermedades como el glaucoma (deficiencia en el drenaje de humor acuoso que daña, mediante presión, a las fibras nerviosas, es una de las principales causas de ceguera) que puede deberse a un bloqueo pupilar, las consecuencias médicas de los pacientes pueden ser más palpables y preocupantes. [34] [35]

Otra cuestión que ha lastrado la fidelidad de las medidas de las pupilas, es el hecho de que hay poca confianza en el procesamiento de imágenes, puesto que éste depende de la resolución de aquéllas, entre mejor cámara, mejor puede darse el procesamiento, pero, como es de esperar, aumentar la resolución de la cámara también sube el costo del equipo y del desarrollo; ante esto, no son pocos los médicos que han recurrido al diagnóstico empírico, basado en la observación (que involucra medidas manuales) y la experiencia [36]. No está de más decir que esto involucra errores humanos. [37] [38]

La medición precisa de este elemento del ojo es crucial puesto que puede ser la diferencia entre el uso de un único tratamiento y el requerimiento de una, o varias, cirugía(s), así como la detección y prevención de enfermedades neurológicas e incluso tumores [20] [34].

La situación de que los especialistas no puedan decidirse en si tomar para la medida el área o el perímetro de la pupila lleva a un sesgo adicional que no termina por impulsar la confianza en el procesamiento de imágenes [37], pues incluso si se decanta por el perímetro estandarizado, éste se considera como si la figura fuese uniforme, algo que no ocurre, por dos motivos: el primero, la forma irregular de la propia pupila, el segundo, porque las imágenes no generan ni trabajan sobre patrones regulares y dependen mucho de la resolución de la cámara que las capture, sin considerar los errores del examinador ni los movimientos del paciente, en especial en pacientes jóvenes.

Estos problemas son intensificados si se considera que incluso los más estudiosos de la pupila no se han dado tiempo para el cálculo de un promedio estándar para la pupila en condiciones normales como en las diversas patologías [32].

Dentro de estas circunstancias, se opta por generar un algoritmo matemático que sea capaz de brindar medidas confiables, con una resolución mínima (y accesible), mediante el procesamiento de imágenes, bajo una técnica adaptativa, construida a partir del diámetro de Feret, que sirva de estándar para proyectos posteriores; dicha técnica contemplaría el cálculo y la promediación

de una cantidad enorme de diámetros, para poder absorber las irregularidades de este elemento del ojo; además de la reconstrucción de elementos faltantes para poder disminuir los imperfectos generados por una baja resolución de la cámara o una pupila cubierta por un párpado, por ejemplo, producto de la ptosis.



# Capítulo 6

## Hipótesis

Algoritmos de morfología matemática basados en la última apertura, combinados con la adaptabilidad del diámetro de Feret en figuras irregulares y microscópicas, permiten estimar el perímetro de las pupilas, a pesar de la calidad de la imagen, la iluminación y las condiciones físicas (como edad y padecimiento) de cualquier paciente y sin depender de las capacidades de procesamiento de los equipos de cómputo de los especialistas.

# Capítulo 7

## Objetivos

### 7.1. Objetivo principal

Demostrar la factibilidad del uso de los operadores morfológicos para la clasificación automática de pupilas, mediante un algoritmo de estimación, a partir del diámetro de Feret.

### 7.2. Objetivos específicos

- Demostrar la utilidad de los operadores morfológicos para identificar la pupila de la imagen del paciente.
- Demostrar que es posible realizar algoritmos basados en el diámetro de Feret, para realizar la medición de las pupilas.
- Validar la posibilidad de obtener y absorber las irregularidades en la forma y en la captura de la pupila.
- Probar que los algoritmos son útiles para la estandarización de medidas.

### 7.3. Alcance

Comparar en porcentaje, la precisión de las medidas de la superficie de las pupilas mediante los algoritmos desarrollados por medio del diámetro de

Feret, con respecto al método de conteo de píxeles del rescate de pupilas mediante algoritmos de morfología matemática basados en la última apertura única y con respecto al método de la circunferencia promedio elaborada a partir de gradientes morfológicos, en las mismas figuras.

# Capítulo 8

## Marco teórico

Este capítulo comprende los conceptos generales que estarán implicados en el desarrollo del proyecto: se comienza con una breve descripción de los componentes del ojo, para dar paso al eje central: la pupila; tras pormenorizar los detalles de este elemento se habla de los instrumentos dedicados a su medición y estudio; se habla también de otro término angular de la investigación: el diámetro de Feret, así como conceptos para la estimación de la pupila. Una vez cubierto este aspecto se describe el procesamiento de imágenes a grandes rasgos y sus tres conceptos fundamentales: dilatación, erosión, segmentación, además de los operadores de apertura y de cerradura.

### 8.1. Morfología del ojo

El ojo es el órgano que lleva a cabo el proceso de visión, pues está encargado de recibir y transformar las ondas de luz recibidas del exterior para convertirlas en señales que interpreta.

De acuerdo a [11] y [12], el ojo está compuesto de la siguiente forma: está ubicado en una cuenca ósea nombrada orbita, dicha órbita posee seis músculos extraoculares adheridos al órgano, los cuales permiten el movimiento del mismo mediante rotaciones, en concreto, están incrustados en la esclerótica, tejido que cubre gran parte del hobo ocular.

La parte con forma de bóveda ubicada en la parte frontal y central del ojo se

nombra córnea y está compuesta de tres capas: mucosa, de agua y oleaginosa, su función es la de enfocar la luz en el ojo, con lo que se induce a los haces de luz a tomar una dirección.

Dentro de la córnea está el humor acuoso, líquido producido de manera frecuente para mantener rellena la bóveda. Al pasar esta cámara se encuentra el iris, cuya utilidad es “dar color” a la visión; lo más interesante del iris es el agujero negro, elemento que recibe el nombre de pupila, pues está encargada de regular la cantidad de luz que entra a la parte más interna del ojo.

Tras la pupila se halla el lente cristalino, mismo que ayuda a dar enfoque a los objetos dependiendo de la cercanía. Detrás de este lente está la cavidad vítrea, que se llena de humor vítreo, el cual ayuda al ojo a no perder la forma y ocupa la mayor parte del órgano. Finalmente se encuentra la retina, ésta se identifica como una membrana compuesta de células nerviosas, su función es transformar las ondas de luz en señales nerviosas, eso lo hace por medio de sus células, denominadas fotorreceptores. Para ejemplificar, se muestra la Figura 8.1.

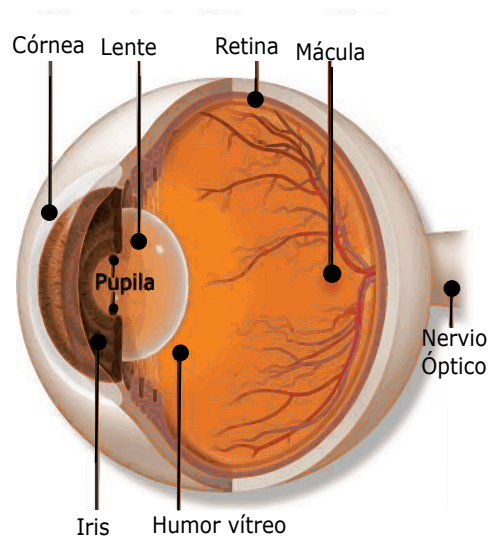


Figura 8.1: Partes del ojo [1]

### 8.1.1. La pupila

El tamaño de una pupila queda determinado por la interacción entre el músculo dilator del iris (inervado por fibras simpáticas) y el músculo esfínter del mismo (inervado por fibras parasimpáticas) [10]. Las fibras simpáticas son originadas en el hipotálamo y recorren el tronco encefálico, la médula espinal, el ápice pulmonar y la arteria carotida. En tanto, las fibras parasimpáticas descienden del hipotálamo y viajan por el tercer par craneal, el cual es un nervio encargado de controlar el nervio ocular, responsable del tamaño de la pupila. Una pupila se contrae en ambientes con brillo y se dilata en la oscuridad.

La vía parasimpática es la encargada de causar la miosis (constricción de la pupila), mediante la activación del esfínter del iris, en tanto, la vía simpática causa midriasis (dilatación de la pupila), por medio de la activación del dilator del iris.

La vía parasimpática surge de los núcleos de Edinger-Westphal. En tanto, las fibras parasimpáticas salen del mesencéfalo como parte del tercer par craneal, de ahí, tales fibras siguen la división inferior del nervio motor ocular hasta hacer sinapsis en el ganglio oftálmico, entre el nervio óptico y el recto lateral. Así, las fibras posganglionares van al esfínter del iris (y al cuerpo ciliar, relacionado con las cejas).

La vía simpática está establecida como una cadena de tres neuronas. La neurona de primer orden sale desde el hipotálamo y se mueve hasta hacer sinapsis en el centro cilioespinal de Budge dentro de la médula espinal. La neurona de segundo orden viaja a través de la cadena simpática, pasando el apéndice pulmonar adyacente antes de hacer sinapsis con la neurona de tercer orden en el ganglio cervical superior. Desde ahí, la neurona de tercer orden viaja con la arteria carótida interna hasta alcanzar el seno cavernoso, donde sigue el sexto par craneal antes de llegar al par craneal V1, en primera instancia como nervio nasociliar y, al final, como los nervios ciliares largos hasta llegar al dilatador del iris. En la Figura 8.2 se puede apreciar la estructura de

ambas vías [2].

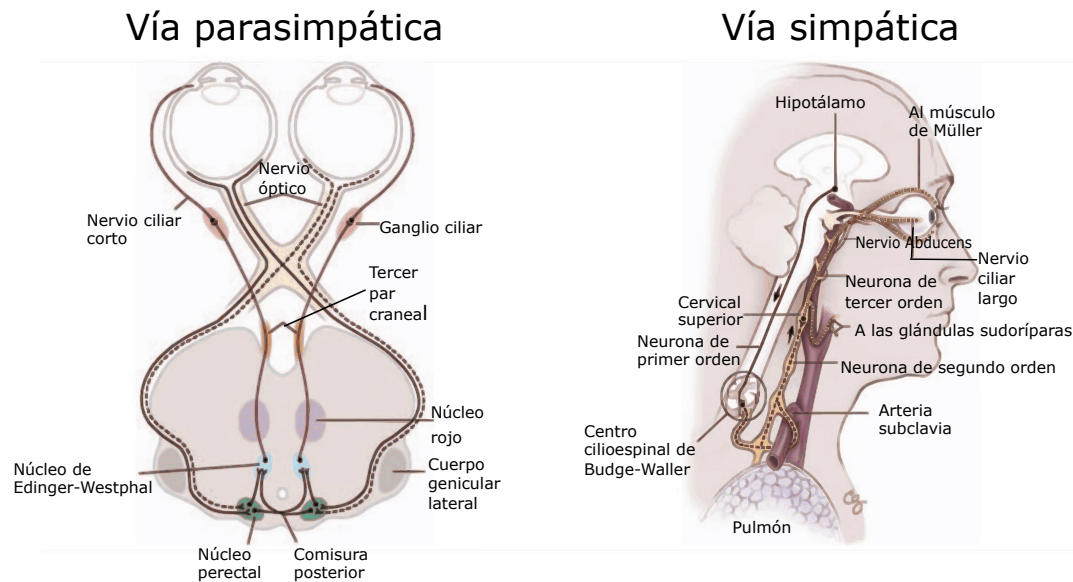


Figura 8.2: Vía parasimpática (izquierda) y vía simpática (derecha) [2]

Las vías parasimpáticas se hallan bajo la influencia de vías de control neuro-anatómicas: así, el tamaño de la pupila depende de condiciones de estabilidad en la iluminación de fondo, el acomodo y la vergencia (el esparcimiento de la luz), mientras que la velocidad del cambio de tamaño se da con el inicio o desplazamiento de la luz [15].

### 8.1.2. Anomalías en la pupila

Como se comentaba en la sección anterior, existen varios padecimientos que tienen su origen en lesiones o parálisis en los nervios involucrados en el funcionamiento de la pupila. Por ejemplo, una parálisis en el tercer par craneal puede generar la presencia de ptosis (caída de los párpados debido al envejecimiento de sus tejidos [39]) y exotropía (desviación externa del ojo [40]).

La disección de la arteria carótida puede derivar en síndrome de Horner agudo, identificado con una pupila pequeña y asociado, en ocasiones, con

dolor en la cara, cabeza o cuello [10].

Uno de los padecimientos más conocidos vinculados al tamaño de la pupila es la anisocoria, la cual está relacionada con la parálisis del tercer par craneal y al síndrome de Horner [41]. Su detección es primordial, pues puede ser una señal alarmante de daños neurológicos ocasionados por aneurismas intracraneales, hemorragias, neoplasias (formación anormal en una parte del cuerpo de un tejido, de carácter tumoral) y tumores pulmonares o cerebrales. [34] Si se presentan anomalías en la pupila, también se puede perder sensibilidad a la luz [41].

El tamaño y la velocidad de cambio de la pupila pueden ser afectados por varios problemas en mecanismos tales como lesiones estructurales en el cerebro, estados de enfermedad y agentes farmacológicos, entre otras causas. [15] [42] Resumiendo los padecimientos más destacados de la pupila: [2]

- Parálisis del tercer par craneal: una pupila con este padecimiento se muestra semi dilatada, sin reacción a la luz o a la convergencia. Se establece que la causa más preocupante de una TNP con anisocoria es un aneurisma de la arteria comunicante posterior.
- Pupila tónica: conocida como pupila de Adie, es otra causa de la anisocoria, suele presentarse como una pupila enorme en mujeres jóvenes y puede acarrear, o no, síntomas visuales. La pupila muestra disociación a la luz cercana y se dilata lentamente con una constricción acomodativa. Puede ser unilateral en un principio y volverse miótica. Su origen puede ser idiopática o puede ser generada por desórdenes autónomos.
- Pupila miótica o farmacológicamente dilatada: puede ocurrir por exposición accidental o intencional a agentes que afectan el funcionamiento pupilomotor. Entre estos agentes se encuentran compuestos de medicamentos o elementos de plantas e incluso insecticidas. Suele contar con una duración de, por lo menos, dos semanas.
- Síndrome de Horner, tradicionalmente se ha vinculado a una lesión de



una neurona, de las involucradas en la vía simpática. Está relacionado con la lentitud en la dilatación y constricción de la pupila o en la nula presencia de este movimiento.

### **8.1.3. Medidas e índices normalizados de la pupila**

Es importante conocer los índices de las pupilas que se han reportado en la literatura médica, pues sirven como referencia para la calibración de pupilómetros y otros procesadores de imágenes y para la generación de datos.

Algunos autores han reportado que el tamaño de la pupila en niños pequeños menores de un año es de 5 mm, misma que suele crecer significativamente hasta los 10 años, en donde alcanza un tamaño promedio de 6.2 mm, tras esta edad ya no hay un incremento significativo.

Esos mismos autores señalan otros estudios en los que se indica que el promedio entre los 20 y 29 años es de 7.33 mm, además se estima que comienza a disminuir con la edad misma, hasta los 5.17 mm, a los 80 años [19].

Otros autores han estipulado que el tamaño de la pupila se encuentra en un rango de 2 mm hasta los 6 mm, dependiendo de la edad, condiciones de luminosidad.

Estos mismos autores, que compararon la eficiencia de la evaluación subjetiva con la de un pupilómetro indicaron que los enfermeros de su grupo estimaron medidas de 2.92 mm [37].

Han habido autores que indican que el tamaño de la pupila se encuentra en un rango desde 2 mm hasta los 7 mm, señalados en un artículo enfocado en determinar si la luminancia de la habitación afecta entre condiciones de poca iluminación o de oscuridad casi total: en este caso demostraron que la pupila en oscuridad casi absoluta tiene un promedio de 6.4 mm, mientras que con muy poca iluminación subía hasta los 5.7 mm y un promedio de 4.4 mm con demasiada iluminación [17].

También se suele establecer un rango para las medidas de entre 1.5 y 8 mm con un tamaño promedio entre 2 y 4 mm, llamándose miótica en el primer

caso y midriática en el segundo según [43], en el caso de los niños suelen mostrarse en su tamaño más grande, mientras que en los adultos mayores se presentan en su menor tamaño.

## 8.2. Instrumentos de oftalmología para la medición de la pupila

Para esta sección se comentan los dos principales instrumentos que emplean los especialistas para realizar la medición de las pupilas: un medidor de pupila y un pupilómetro, siendo el primero un instrumento analógico, mientras que el segundo es un dispositivo digital.

### 8.2.1. Medidor de pupila

Instrumento de uso común para la medición y evaluación de pupilas de manera subjetiva, es decir, mediante la observación del especialista. Puede ser una regla milimétrica o incluso contar con una serie de círculos que van desde los 2 mm hasta los 10 mm, separados por un margen. Su modo de empleo es el siguiente: el especialista la coloca por encima de los ojos del paciente y compara la pupila de éste con algún modelo de la plantilla, para hacer una estimación entre los diámetros predefinidos. También se pueden utilizar reglas de graduación milimétrica para los mismos fines, ambos instrumentos utilizados como apoyo para la medición por parte de los profesionistas [23] [36] [38].



Figura 8.3: Medidor de pupilas [3]

Sin embargo, al contar con índices preestablecidos y al depender del juicio y observación del médico, es muy poco confiable para la clasificación de las pupilas.

### 8.2.2. Pupilómetros

Un pupilómetro es un sistema con iluminación infrarroja que analiza la dinámica de las pupilas en un periodo; cuenta con la particularidad de que el ángulo y la intensidad de la luz son controlados, además, se registran varias evaluaciones, ya sea mediante la captura de video, de fotografías o la observación en tiempo real de las pupilas. [7] [37] [38]

Suelen ser dispositivos portátiles o fijos no invasivos situados a una distancia del paciente (normalmente 1 metro [19]), cuentan con un sistema de iluminación infrarroja (para la realizar las pruebas en ambientes de poca iluminación), además de una capturadora de imágenes que puede ser desde una cámara tradicional como la que se encuentra en un teléfono inteligente o bien, una videocámara. Generalmente suele ir conectado a un ordenador que se encarga de entregar resultados para que el especialista pueda llevar a cabo sus diagnósticos, aunque también puede estar vinculado a un programa en el que se ejecutan algoritmos de procesamiento de imágenes, con el objetivo de automatizar el proceso [15].

Para ejemplificar mejor la estructura de un pupilómetro se recurre al trabajo previo realizado por [4], observado en la Figura 8.4.

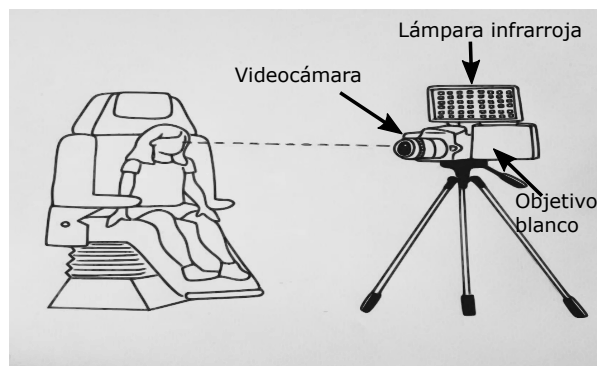


Figura 8.4: Esquema de un pupilómetro [4]

De la Figura (8.4) se aclara que será la estructura básica en la que se ha de basar el presente proyecto de investigación. Cabe destacar que la cámara de video tiene como utilidad el capturar imágenes y video de las pupilas del paciente y se propondrá el empleo de un lente de montura tipo c, para lograr acercamientos mediante lentes sin que se realicen éstos de manera digital, puesto que se resta calidad a la imagen; también se utilizarán filtros infrarrojos para reducir la luz involucrada al mínimo indispensable, con el fin de evitar que los reflejos interfieran en los contornos y mediciones; además, la cámara irá conectada a una computadora, la cual, mediante una aplicación (bien sea de elaboración propia o proporcionada por el fabricante), servirá para la observación de pupilas, de manera que el especialista pueda capturar las imágenes que considere más útiles. La lámpara infrarroja es para brindar iluminación que no genere reacción en las pupilas del paciente, mismas que estarán enfocadas en un objetivo blanco para evitar el reflejo de la luz infrarroja.

### 8.2.3. Mercado de los pupilómetros

Complementando la información de los dos anteriores apartados, actualmente en el mercado de equipo médico, los dispositivos listados se mueven en un rango de precios que dependen del instrumento y de sus capacidades. En esta sección se deja patente el costo de diversos instrumentos que permi-

ten la medición de pupilas. Como nota aclaratoria: los precios aquí reflejados fueron obtenidos en dólares para tener una noción estándar y aproximada del valor de estos artículos y se consultaron en diversas páginas tanto especializadas en la venta de equipo médico como de venta de artículos generales, durante el mes de junio del año 2022, por lo que los precios están sujetos a cambios.

### **Precio de instrumentos analógicos**

Por ejemplo, el medidor de pupilas de la marca *Prestige Medical*, visto en la Figura 8.3, cuenta con un precio aproximado de **15 dólares** (con costos de envío y de importación); de esta misma marca se pueden encontrar algunas variantes que se venden en torno a los **18 dólares** (incluyendo costos de envío y de importación).

Sin embargo, y como se hace alusión en la sección de los medidores de pupila, también se pueden utilizar reglas comunes (siempre que cuenten con escala milimétrica o micrométrica), las cuales cuentan con un costo de aproximadamente **6 dólares**.

Otra alternativa es utilizar un calibrador Vernier, estos van de los **6** a los **120 dólares**, en su variante tradicional, si se busca un calibrador digital, es importante remarcar que estos se pueden conseguir desde los **6 dólares**, pero su precio puede aumentar hasta los **150 dólares o más** (dependiendo de la calidad, del material y de la precisión que se desea).

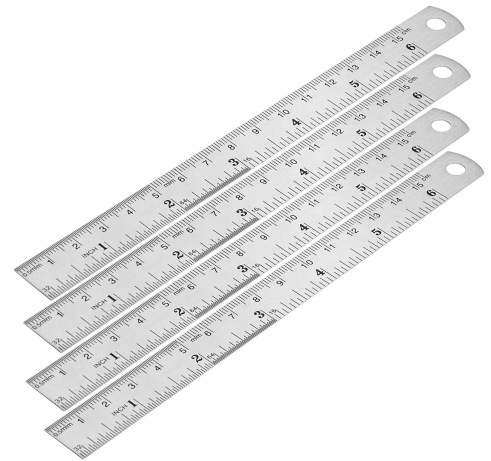
Sin embargo, hay que resaltar que esta categoría de instrumentos depende mucho del juicio de los especialistas, además hay que recordar que las medidas son en la escala milimétrica, por lo que puede requerirse alguna lupa o instrumento óptico para mejorar la observación.

En la Figura 8.5, se muestran algunos ejemplos de los equipos expuestos.

Los precios de los equipos especializados suelen ser más elevados que las alternativas aquí presentadas, tal y como se mostrará en el siguiente apartado.



(a) Medidor de pupilas *Prestige Medical*, costo: 18 dólares.



(b) Reglas milimétricas *Amazon*, costo: 13 dólares el paquete.



(c) Calibrador Vernier de acero *Fowler*, costo: 110 dólares.

Figura 8.5: Ejemplos de medidores análogos.

### Precios de equipos especializados

En esta categoría se enlistan algunos ejemplos ya relacionados con equipos dedicados al campo de la oftalmología por lo que tanto los precios como los lugares donde pueden ser adquiridos son más restringidos.

Es importante remarcar que existen instrumentos dedicados a la medición de la distancia pupilar, los cuales también son llamados pupilómetros, no obstante, tales dispositivos serán excluidos en este trabajo debido a que se alejan

del funcionamiento principal del proyecto que es el de medir pupilas, en cambio, aquellas herramientas son utilizadas por optometristas al momento de la elaboración de lentes.

Tomando en cuenta lo anterior, el principal dispositivo empleado es el denominado pupilómetro infrarrojo, la marca más común es el *NPi* tanto en su modelo 200 como 300, de la marca *NeurOptics*, el precio del *NPi-200* (lanzado en el año 2018) es de alrededor de **4900 dólares**, mientras que el modelo *NPi-300* (con fecha de lanzamiento en julio de 2021) ronda los **5500 dólares**. La diferencia entre un modelo y otro es la actualidad del modelo 300, contando con una interfaz gráfica más intuitiva, además de garantizar una mayor estabilidad en las mediciones. [44], [45], [46]

Sin embargo, también existen algunas marcas más económicas como el pupilómetro *Colvard* modelo *Oasis 0401A*, este se basa en una mirilla graduada, similar a los binoculares, para ajustar la medición, cuenta con un precio en mercados de segunda mano que va desde los **200 dólares** hasta los **450** nuevo, sin contar con gastos de envío. Otra marca un tanto económica son los pupilómetros de la marca *Procyon* en sus modelos *P2000* y *P3000* con un rango de precio que inicia desde los **185 dólares** y asciende hasta un total de **620 dólares**, siendo que el último es un modelo más reciente que cuenta, a su vez, con mayor repetitividad.

De la propia marca *NeurOptics* existen modelos más antiguos como el *DP-1000* que se tasa en **800 dólares** en el mercado de segunda mano, o el *VIP-300*, con un valor de **1700 dólares**.

No obstante, ya se dan alternativas que bien pueden sustituir a un pupilómetro convencional, la primera de ellas se sigue considerando, según sus desarrolladores, un pupilómetro, pues es la aplicación para teléfonos móviles y tabletas de nombre *Reflex*, desarrollada por la compañía *Brightlamp*, esta aplicación detecta y mide las pupilas a partir de la cámara del dispositivo en cuestión; la particularidad es que requiere de un costo para su uso, a manera de suscripción el cual es de **400 dólares** al año en su versión estándar, la

cual sólo mide las pupilas; la otra versión disponible es la denominada *Reflex PRO* que permite el diagnóstico automatizado de cuestiones como anisocoria, miosis, midriasis o pupila tónica; esta última versión también proporciona gráficas para facilitar el estudio al especialista. [47] Otra aplicación disponible en el mercado es la conocida como *Dynamic Pupillometry* o *DP-App*, desarrollada por *Adaptica*, con un costo de **420 dólares**, sin embargo, cuenta con el inconveniente de que sólo es compatible con el refractómetro *2WIN-4* diseñado por la misma compañía, el cual tiene un costo de **6770 dólares**. [48] [49]

Un instrumento utilizado para el estudio general de la pupila que también entrega mediciones en una interfaz de usuario es el campímetro, enfocado principalmente al estudio del campo visual, en otras palabras, ayuda a detectar puntos ciegos en el propio ojo, útil para padecimientos como el glaucoma. Se distingue por tener una forma como la vista en la Figura 8.6b: se puede observar que cuenta con una computadora propia. Su característica de medir regiones hace posible que pueda medir con exactitud una pupila. No obstante, los costos de estos dispositivos se manejan en rangos que van de los **8700 dólares** hasta los **15890 dólares**, se destacan, por parte de la marca *FREY* el *AP-300*, de la marca *ZEISS* el modelo *HFA 750i* y de la marca *Kanghua* los modelos *APS-6000* y *APS-T00*. [50] [51]

Un instrumento que también puede ayudar a la medición de la pupila, aunque no es su objetivo, es el topógrafo corneal, debido a que este está dedicado a detectar la superficie (en concreto la curvatura) de la córnea, es útil para el diagnóstico de cataratas, por ejemplo. El costo de este dispositivo varía entre los **4800 dólares** y los **5500 dólares**. Un modelo muy destacado es el *SW-6000* de la marca *SUOER*. [52] [53]

En la Figura 8.6 se pueden apreciar algunos modelos de los equipos mostrados en este apartado.





(a) Pupilómetro digital *NPi-200* de *NeuroOptics*, costo: 4900 dólares. [44]



(b) Campímetro *Frey AP-300*, costo: 11300-15890 dólares. [54]



(c) Topógrafo Corneal *SW-6000*, costo: 5500 dólares. [53]

Figura 8.6: Ejemplos de medidores digitales.

El uso de este apartado de precios es para poner en contexto el costo del equipo con el que se ha trabajado en este proyecto y presentar, con base en ello, alguna ventaja monetaria así como un espacio en el cual esta propuesta puede encontrar un hueco.

### 8.3. Conceptos para la estimación de la pupila

La estimación de la pupila no depende de medidas aleatorias, para ello se deben considerar conceptos, dada su morfología, para generar buenas estimaciones sobre el diámetro, perímetro y área de la misma. De hecho, son esenciales para su correcto estudio. Entre ellos destacan el diámetro de Feret y el concepto empleado por [4] denominado pupila patrón, mismos que serán abordados en los siguientes apartados.

#### 8.3.1. Diámetro de Feret

El diámetro de Feret es una medida estandarizada que se utiliza para obtener tanto perímetros como áreas de figuras irregulares como la propia pupila, o contornos de esta naturaleza, pues consiste en una traza que varía de acuerdo a las condiciones de la superficie, en otras palabras, es “la longitud proyectada del perfil de partículas con respecto a una posición fija” [14].

Este concepto se emplea para figuras irregulares que sean además muy pequeñas, en dimensiones de los micrómetros  $\mu m$  a los milímetros mm, es decir, en el área de la microscopía. La manera de emplearlo en las pupilas se ejemplifica en la siguiente figura:

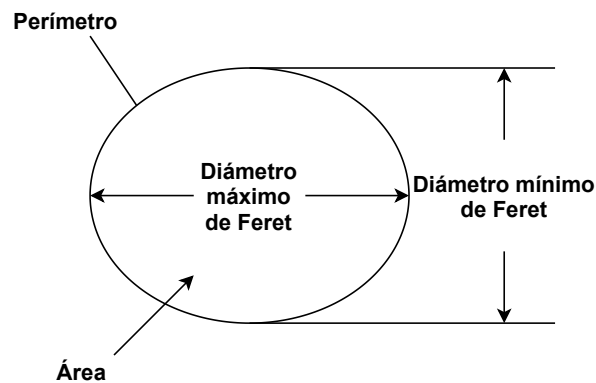


Figura 8.7: Ejemplificación del diámetro de Feret [4].

Como se observa, cuenta con una medida máxima y una mínima, esto sucede así en todas las superficies que se han de medir (pupilas, poros, micro-

organismos o partículas [55]), puesto que algunos autores incluso la definen como la distancia que existe entre dos tangentes en una figura, puede ser la distancia máxima como la mínima.

Una de sus principales características es la de reconstruir una figura a partir de un fragmento de la misma, mediante estimaciones, por lo que no se limita a la medición, no obstante, el común denominador es su utilidad en el análisis de imágenes. [56] [57]

Es por esta razón y estas características que es un concepto que se abordará durante la realización del presente proyecto.

### 8.3.2. Pupila patrón (PP) e índices normalizados

Concepto introducido por [4], en él, el área de ambas pupilas juega un rol central, pues se emplea el área promedio computarizada, con la finalidad de detectar pequeños cambios en los tamaños. Permite la introducción de una referencia para analizar cada pupila de forma independiente usando índices normalizados, con lo que los problemas de escalamiento de imágenes no aparecen. Es útil pues, para identificar la diferencia de tamaño de cada pupila que se analiza. En su definición se especifica como: “el área de un círculo cuyo diámetro es equivalente al valor promedio de los diámetros máximos de Feret de ambas pupilas”:

$$PP = \pi \frac{(FM_{PR} + FM_{PL})^2}{16} \quad (8.1)$$

Donde  $FM_{PR}$  y  $FM_{PL}$  representan el diámetro máximo de Feret de las pupilas derecha e izquierda. Esta ecuación que proviene del cálculo del área de un círculo. A partir de la obtención de este elemento se pueden obtener los índices de cada pupila, con base en sus áreas y en términos de PP:

$$i_{ipr} = \frac{A_{rp}}{PP} \quad (8.2)$$

$$iip_l = \frac{A_{lp}}{PP} \quad (8.3)$$

Estos índices tienen la capacidad de proporcionar información individual de cada pupila, además de un índice normalizado para el tamaño regular de la pupila de un paciente:

$$nidp = abs(iip_r - iip_l) = \frac{abs(A_{rp} - A_{lp})}{PP} \quad (8.4)$$

Donde nidp representa un índice normalizado basado en la diferencia de las áreas entre ambas pupilas y abs denota el valor absoluto. Es útil para la detección de la anisocoria, por ejemplo.

Los índices de una pupila también pueden estar determinados por su perímetro:

$$nip_p = \frac{prp}{plp} \quad (8.5)$$

Donde nipp representa un índice normalizado usando los dos perímetros de las pupilas, los cuales son prp y plp.

Se reportó una mayor cantidad de rangos con el nidp (basado en los diámetros).

## 8.4. Procesamiento de Imágenes

De acuerdo a [5], una imagen puede ser definida como una función bidimensional de tipo  $f(x, y)$ , donde  $x$  y  $y$  son coordenadas en el espacio, en tanto, la amplitud de  $f$  en un par de coordenadas es denominado intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto. Cuando  $x$ ,  $y$  y las amplitudes de  $f$  son todas finitas, en cantidades discretas, se le nombra a la imagen como imagen digital. El área de procesamiento de imágenes digitales hace referencia a una computadora digital. Se destaca que una imagen está compuesta de un número finito de elementos, los cuales tienen una ubicación y un valor particulares. Estos elementos son referidos como elementos de la imagen,

píxeles y pels. Está basado en las computadoras, dado que el humano está limitado a una visión contenida en una fracción del espectro electromagnético, así, las computadoras pueden operar en imágenes (y señales) generadas por recursos que los humanos no acostumbran a relacionar con imágenes (espectro infrarrojo y ultravioleta). Estas señales incluyen al ultrasonido, electrones en microscopía, imágenes generadas por computadora.

Sus principales aplicaciones son médicas (análisis de resonancias electromagnéticas, ultrasonidos, rayos x), así como su uso en inteligencia artificial, enfocada a la visión artificial, que es un gran estandarte para la toma de decisiones de una máquina.

En resumen, consiste en manipular, estudiar y diseccionar a una imagen en sus componentes más básicos, de manera digital, basando gran parte del estudio en píxeles, así como en operadores matemáticos como la transformada de Fourier. [6]

## **8.5. Morfología matemática**

En [6] y [5] se define como la teoría para el análisis de estructuras espaciales. Recibe el nombre de morfología porque tiene como objetivo analizar la forma de los objetos. Es matemática debido a que el análisis está basado en teoría, geometría integral e incluso álgebra. Es entendida como una técnica poderosa para el análisis de imágenes.

Algunos conceptos que serán de ayuda en el estudio de las pupilas serán la dilatación, la erosión y la segmentación, los cuales se presentan en las siguientes subsecciones.

### **8.5.1. Elemento estructurante**

El elemento estructurante está definido como un conjunto geométrico que cuenta con las siguientes características: tamaño, forma y origen. Tal conjunto se desliza sobre la imagen de estudio, de forma que puede determinar la can-

tividad de píxeles (o puntos) que serán participes de cada operación efectuada en los distintos componentes de la imagen.

Puede haberlos de dos y tres dimensiones. En este trabajo se utilizarán los primeros: en dicha categoría puede haber discos, hexágonos, líneas rectas, cuadrados, diamantes, etc. Para los de tercera dimensión, estos se manejan como poliedros.

En la literatura, el elemento estructurante se denomina por  $B$ . [6] [58]

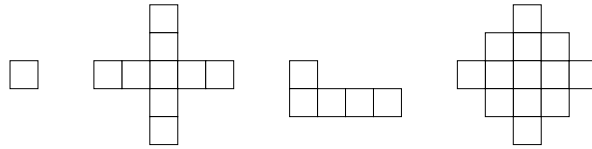


Figura 8.8: Ejemplos de elementos estructurantes bidimensionales

### 8.5.2. Dilatación

Tanto la dilatación como la erosión son operaciones fundamentales para el procesamiento morfológico. Una forma de ver este concepto es, de acuerdo a [6]: el lugar geométrico, junto con sus puntos, donde el elemento estructurante golpea el conjunto, se convierte en un conjunto dilatado. En este sentido, “ $\delta_B(X)$  es la expresión de la dilatación de un conjunto  $X$  ejecutada por un elemento  $B$ , siendo también el lugar geométrico de los puntos  $x$  tal que  $B$  golpea a  $X$  cuando su origen coincide con  $x$ ”:

$$\delta_B(X) = \{x | B_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (8.6)$$

La dilatación de un píxel (denotada como  $x$ ) resulta en la transpuesta del elemento estructurante, centrada en  $x$ :  $\delta_B(x) = \check{B}(x)$ . Reescribiendo (8.6) en términos del conjunto de traslaciones definidas por el elemento estructurante:

$$\delta_B(X) = \bigcup_{b \in B} X_b \quad (8.7)$$

Esta ecuación tiene su propia versión para imágenes binarias o en escala

de grises: “ $\delta_B(f)$  es la dilatación de la imagen  $f$  por los vectores (representados por  $-b$ ) del elemento estructurante ( $B$ )”:

$$\delta_B(f) = \bigvee_{b \in B} f_{-b} \quad (8.8)$$

Otra forma de apreciar esta operación es: considerando a  $A$  y  $B$  como conjuntos en  $Z^2$ , la dilatación de  $A$  por  $B$ , denotada como  $A \oplus B$  está definida como:

$$A \oplus B = \left\{ z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset \right\} \quad (8.9)$$

Se basa en la obtención de la reflexión de  $B$  sobre su origen y desplazarla sobre el eje  $z$ . La dilatación de  $A$  por  $B$  es, entonces, el conjunto de todos los desplazamientos de  $z$ , tales que  $B$  y  $A$  se superponen en al menos un elemento. La ecuación anterior puede ser reescrita como:

$$A \oplus B = \left\{ z \mid [(\hat{B})_z \cap A] \subseteq A \right\} \quad (8.10)$$

El conjunto  $B$  es comúnmente referido como el elemento estructural en la dilatación, así como en otros operadores morfológicos [5] [6].

### 8.5.3. Erosión

La erosión es el operador dual de la dilatación. En este caso, el lugar geométrico de los puntos donde el elemento estructurante encaja en el conjunto es conocido como el conjunto erosionado. En palabras de [6]: “la erosión de  $X$  (considerando a esta como un conjunto) por  $B$  (el elemento estructurante), está dada por  $\varepsilon_B(X)$ ; su definición es: el lugar geométrico de puntos  $x$  de tal modo que  $B$  está en  $X$  cuando su origen es posicionado en  $x$ ”:

$$\varepsilon_B(X) = \{x \mid B_x \subseteq X\} \quad (8.11)$$

Esta ecuación puede ser descrita como la intersección de un conjunto de traslaciones (determinadas por el elemento estructurante):

$$\varepsilon_B(X) = \bigcap_{b \in B} X_{-b} \quad (8.12)$$

Y, al igual que la dilatación, su definición puede ser trasladada a imágenes binarias y en escala de grises: denotada como  $\varepsilon_B(f)$  (erosión de  $f$  por  $B$ ), y su definición es el mínimo de las traslaciones de la imagen ( $f$ ) por los vectores  $(-b)$  del elemento estructurante  $B$ :

$$\varepsilon_B(f) = \bigwedge_{b \in B} f_{-b} \quad (8.13)$$

Para un par de conjuntos  $A$  y  $B$  en  $Z^2$ , la erosión de  $A$  por  $B$ , escrita como  $A \ominus B$  está definida como

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (8.14)$$

Esta ecuación indica que la erosión de  $A$  por  $B$  es el conjunto de todos los puntos  $z$  tales que  $B$ , transformados por  $z$  están contenidos en  $A$ .

La dilatación y la erosión son operadores duales uno respecto del otro, es decir:

$$(A \ominus B)^c = A^c \oplus \hat{B} \quad (8.15)$$

Ambos conceptos sirven, a modo de complemento, para tratar los fragmentos de una imagen y abstraer partes específicas que se han de tratar, en el caso del proyecto serán las pupilas del rostro.

#### 8.5.4. Segmentación

Según [59] es entendida como el proceso de particionar una imagen en partes o regiones. Dicha división se suele basar en las características de los píxeles de la imagen. Como ejemplo, una manera de encontrar regiones en una imagen es buscar discontinuidades abruptas en los valores de píxel, que suelen



indicar bordes. Tales cambios pueden definir regiones. También se acostumbra a dividir imágenes en función de colores o la textura.

Para [6] cada región tiene ciertas propiedades; en una imagen segmentada los elementos más básicos no son píxeles sino conjuntos de píxeles conectados. Al segmentarse la imagen, las medidas son ejecutadas en cada región y se investigan las relaciones adyacentes.

En lo referente a la matemática, la segmentación de una imagen  $f$  es una partición de la definición de su dominio  $D_f$  en  $n$  conjuntos no vacíos  $X_1, X_2, \dots, X_n$  denominados segmentos, de tal forma que la unión de éstos equivale al dominio  $D_f$ . Para poder segmentar una imagen se debe de tener conocimiento sobre características como forma, tamaño, orientación, distribución de grises y textura; de esta manera, dichas características permiten discriminar dos objetos diferentes de la imagen. La segmentación depende de la iluminación, la resolución del dispositivo adquisidor, el ángulo de visión, el nivel de ruido, entre otros.

Los algoritmos de segmentación están basados en dos propiedades de la intensidad de los valores: discontinuidad y similitud: en el primer aspecto, el acercamiento a la partición de una imagen se basa en cambios abruptos en la intensidad. La segunda propiedad se refiere a la partición de la imagen en regiones que son similares, de acuerdo a un conjunto de criterios definidos.

[5]

Para observar discontinuidades se ejecuta una máscara a través de la imagen, este procedimiento involucra la computación de suma de productos de los coeficientes con la escala de grises en la región contenida en la máscara. La respuesta de la máscara en cualquier punto de la imagen está dada por:

$$R = w_1z_1 + w_2z_2 + \dots + w_nz_n = \sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (8.16)$$

La técnica más común para la segmentación suele ser la transformada de la cuenca. El valor más pequeño tomado por la imagen en escala de grises  $f$

en su dominio  $D_f$  está denotado por  $h_{min}$  y el mayor por  $h_{max}$ . La cuenca de captación asociada con un mínimo se denota por  $CB(M)$ . Los puntos de esta cuenta que tienen una altitud menor o igual a  $h$  se indican con:

$$CB_h(M) = \rho \varepsilon CB(M) | f(\rho) = CB(M) \cap T_{t \leq h}(f) \quad (8.17)$$

Se denota por  $X_h$  al subconjunto de todas las cuentas capturadas que tienen valores en la escala de grises menor o igual a  $h$ , tal que:

$$X_h = \cup_i CB_h(M_i) \quad (8.18)$$

Este concepto ayudará a determinar en qué parte inicia y termina el contorno de la pupila, para poderla separar.

### 8.5.5. La última apertura

Considerando a [5] y [6], el operador de apertura es útil para suavizar los contornos de un objeto, removiendo asperezas que pudieran encontrarse en bordes estrechos. Este concepto surge a favor de la recuperación de pérdidas, en términos de las estructuras, generado por el operador de erosión.

Su funcionalidad consiste en dilatar una imagen previamente erosionada, sin cambiar el elemento estructurante (aunque en la operación exterior sí que debe aplicarse la traspuesta al elemento estructurante). Es importante notar que no todas las estructuras pueden ser recuperadas, en especial aquellas destruidas por la erosión, considerando que la imagen ya ha pasado por este operador; no hay operador inverso para recuperar la imagen original. Su principal aplicación es en el filtrado de imágenes.

Así,  $\gamma_B(f)$  es la representación de la apertura de una imagen, ejecutada por un elemento estructurante

$$\gamma_B(f) = \sigma_{\check{B}}[\varepsilon_B(f)] \quad (8.19)$$

Es la dilatación con la traspuesta de  $B$  después de ejecutar una erosión de

la imagen por  $B$ . También, la apertura puede ser entendida como la unión de la intersección de traslaciones. El conjunto abierto es la unión de los elementos estructurantes que encajan en el conjunto.

$$\gamma_B(X) = \bigcup \{B | B \subseteq X\} \quad (8.20)$$

Una variación de este concepto es mostrado en [60], recibiendo el nombre de “la última apertura”; fue creada como un operador residual y es representada como:

$$\nu = \bigvee_{i \in I} (\gamma_i - \gamma_{i+1}) \quad (8.21)$$

Donde *gamma* identifica a una apertura,  $i$  se corresponde con el tamaño de un elemento estructurante, en tanto que  $I$ , corresponde a un conjunto de diferentes tamaños de estos.

Este operador en el dominio binario corresponde a la identidad. En términos matemáticos, cambia la función inicial (una imagen) por la unión de los cilindros representativos del subconjunto de la función original. Es usado a menudo para extraer información sobre un objeto en la forma de discos críticos. También, en el dominio binario, es un filtro que remueve discos no críticos.

Se hace una distinción sobre los cilindros significativos, siendo estos interpretados como los cilindros más grandes y altos incluidos en la sub-gráfica de la función inicial; de este modo, se toma en cuenta el cilindro más grande que cubre cada punto de la imagen, con lo que se enfatiza en el tamaño de dichos elementos.

Se destaca una función particular de este operador de última apertura: la función asociada  $s$  que es nombrada *función granulométrica* compuesta de la siguiente forma: en cada punto  $x$ , el valor de  $s(x)$  es igual al tamaño del disco más grande que cubre este punto  $x$  (para una imagen binaria), o el radio del cilindro significativo más grande de la reconstrucción parcial que cubre.

Dicho en términos matemáticos, si se toma esta función como  $\Phi$ , entonces la definición es, de acuerdo a [25]:

$$\Phi = \{\max(i) : (\gamma_i(f) - \gamma_{i+1}(f))(x) > 0 \wedge \text{máximo}\} \quad (8.22)$$

### 8.5.6. Transformaciones geodésicas

Existen transformaciones por reconstrucción, hechas a partir de transformaciones geodésicas.

En este aspecto existen dos variantes de los operadores morfológicos básicos: la dilatación geodésica y la erosión geodésica.

Para atender estas definiciones se comienza por la dilatación geodésica de tamaño uno, dada por:

$$\delta_f^1(g)(x) = f(x) \wedge \delta(g)(x) \quad (8.23)$$

Donde  $g(x) \leq f(x)$ . Por su parte la erosión geodésica de tamaño uno se da por:

$$\varepsilon_f^1(g)(x) = f(x) \vee \varepsilon(g)(x) \quad (8.24)$$

Con  $g(x) \geq f(x)$ . Cabe destacar que el principal reclamo de este tipo de transformaciones es que trabajan sobre una zona en específico, en lugar de afectar a toda la imagen, dicha zona se conoce como máscara, siendo esta un subconjunto de la imagen completa. Por otro lado,  $g(x)$ , debe entenderse como el marcador que señala la posición con la que se trabajará. También se recalca que permiten modificar mínimos y máximos sin alterar a otros componentes. Sin embargo, para que estos elementos sean transformaciones más efectivas, debe llevarse a cabo su ejecución a un límite, objetivo marcado por la estabilidad alcanzada a través de la iteración de (8.23) y (8.24), con esta condición se pueden obtener las transformaciones:

$$R_f(g)(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \delta_f^n(g)(x) \quad (8.25)$$

$$R_f^*(g)(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \varepsilon_f^n(g)(x) \quad (8.26)$$

Es así que cuando el marcador  $g$  es igual a la erosión  $g(x) = \varepsilon_\mu(f)$  se obtiene la apertura por reconstrucción  $\tilde{\gamma}_{\mu B}(f)$ . En tanto, si el marcador  $g$  es igual a la dilatación de la imagen  $g(x) = \delta_\mu(f)(x)$ , el resultado obtenido será la cerradura por reconstrucción  $\tilde{\varphi}_{\mu B}(f)$ . Las definiciones formales serían:

$$\tilde{\gamma}_{\mu B}(f) == \lim_{n \rightarrow \infty} \delta_f^n(\varepsilon_{\mu B}(f))(x) \quad (8.27)$$

$$\tilde{\varphi}_{\mu B}(f)(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \varepsilon_f^n(\delta_{\mu B}(f))(x) \quad (8.28)$$

Sirve para rescatar elementos concretos que pudiesen presentar ruido (partículas no deseadas que han sobrepasado algún filtro previo). [25] [61]

### 8.5.7. Gradiente morfológico

Una herramienta útil para detectar cambios de contraste (y utilizada en buena medida para detectar bordes en las formas) su definición viene dada por:

$$grad_\mu(f)(x) = \delta_\mu(f)(x) - \varepsilon_\mu(f)(x) \quad (8.29)$$

Estos cambios pueden ser detectados gracias a una aproximación de este elemento. Es importante remarcar el tamaño idéntico del elemento estructurante.

Pueden encontrarse otros gradientes morfológicos: internos y externos, que varían dependiendo de si se elige entre la dilatación y la erosión, al momento de trabajar la imagen original. Así, el gradiente interno es:

$$grad_i_\mu(f)(x) = f(x) - \varepsilon_\mu(f)(x) \quad (8.30)$$

Mientras que el gradiente externo es:

$$grade_{\mu}(f)(x) = \delta_{\mu}(f)(x) - f(x) \quad (8.31)$$

Otro gradiente que es de gran interés en el área de la morfología matemática es de hecho una transformación, conocida como "tophat" (sombbrero de copa en español), que consiste en la diferencia aritmética entre la imagen original y la imagen a la que se le ha aplicado una apertura, también puede ser la diferencia entre la imagen a la que se le ha aplicado la cerradura y la imagen original; como diferencia principal es que la primera tiende a los blancos (identificada como *white* en inglés) y la segunda a los negros (identificada como *black* en inglés), respectivamente se identifican como (8.32) y (8.33) de acuerdo a [58]:

$$Thw_{\mu}(f)(x) = f(x) - \gamma_{\mu}(f)(x) \quad (8.32)$$

$$Thb_{\mu}(f)(x) = \varphi_{\mu}(f)(x) - f(x) \quad (8.33)$$

Como nota adicional, la apertura es un elemento anti-extensivo mientras que la cerradura es un elemento extensivo, los resultados de estas últimas transformaciones serán no negativas.

Todos los gradientes juegan un papel importante en la segmentación de imágenes, aunque, en este trabajo se ha recurrido a ellos como elementos de medición.

# Capítulo 9

## Métodos

En esta sección se abordan aspectos cruciales en la estructura del proyecto, mismos que permiten trazar el rumbo que se ha de seguir para su realización y que plantean la base de lo que se ha desarrollado durante la maestría. Se compone de: la metodología bajo la cual se realizó la investigación; también se aborda el pensamiento que se ha seguido para el funcionamiento del pupilómetro, así como para el procesamiento de imágenes. Otro de los apartados describe a los participantes de los experimentos; además de las consideraciones éticas, necesarias para evitar cualquier incumplimiento de una actitud profesional, incluyendo un apartado referente a las consideraciones clínicas en las que se describe el equipo utilizado y las condiciones de captura de imágenes; también aborda la manera en cómo se podrá validar o rechazar los experimentos y la hipótesis.

### 9.1. Recursos materiales

Previendo consideraciones ambientales y con la consigna de tener un impacto económico ligero para el investigador y posibles clientes, la lista de materiales muestra explícitamente los elementos absolutamente necesarios para el desarrollo del proyecto:

- Cámara con visión nocturna, a una resolución mínima de 1 MP (1000x1000p).

- Filtros para luz infrarroja de longitud de onda 850 nm.
- Lentes macro para el acercamiento de la cámara de forma óptica.
- Fuente de alimentación CD.
- Computadora personal.
- Programa de cómputo ‘Matlab’.
- Trípode para la cámara.
- Tarjeta de memoria para almacenamiento de imágenes y procesamiento de datos.

## 9.2. *MATLAB*

*MATLAB* proviene de la abreviatura *MATrix LABoratory*, que se traduce, de forma literal, como laboratorio de matrices. Es un lenguaje desarrollado y distribuido por *Mathworks*, creado para analizar, diseñar y resolver sistemas y/o problemas de ingeniería, así como del ámbito científico en general.

Su funcionamiento está basado principalmente en matrices y variables de estado, es ideal para expresar matemáticas computacionales. Incluye gráficos (ya sea en 2D o 3D) que ayudan a la recopilación y análisis de datos mediante métodos numéricos, para reforzar la toma de decisiones.

Cuenta con la posibilidad de añadir módulos (como *Simulink*), para trabajar en otros ámbitos como el diseño de sistemas de control, o en el procesamiento de señales (continuas o discretas) e imágenes; además de aplicaciones de *Deep Learning*, finanzas, robótica, entre otros.

Ofrece algunas características como la gestión de datos, control de flujo, automatización, programación orientada a objetos e integración de control de fuentes.

*MATLAB* tiene su propia extensión de archivos (*.m*), que es conocido como el lenguaje M, cuyos códigos se pueden migrar a lenguajes como C/C++



y HDL, de modo tal que sus aplicaciones pueden adaptarse a sistemas embebidos.

Fue creado y desarrollado por el matemático Cleve Moler, con un eventual lanzamiento en el año de 1984, con el objetivo de emplearse en el análisis numérico, evitando escribir en dicho lenguaje. [62]

Otra de las ventajas que entrega Matlab es la capacidad de desarrollar una interfaz de usuario que se puede construir y programar para que se realice una acción en específico, la herramienta que permite esto es conocida como *GUIDE*. Esta herramienta permite la creación de aplicaciones sencillas con una interfaz de usuario simple. El nombre es la abreviatura de entorno de desarrollo de *GUI* (por sus siglas en inglés, *Graphic User Interface Development Environment*); contiene las herramientas necesarias para diseñar interfaces de usuario para aplicaciones personalizadas. Cuenta con un editor de diseño que permite el desarrollar gráficamente la interfaz de usuario, así como por código de *Matlab*, de hecho, *GUIDE* genera el código de *Matlab* de forma automática, al modificar éste se puede programar el comportamiento de la aplicación.

Una interfaz gráfica de usuario (denominada por sus siglas en inglés como *GUI*) es aquella aplicación con un frontal gráfico que representa un programa, cuenta con controles, menús, barras de herramientas, botones y barras deslizantes. *Matlab* ya cuenta con sus aplicaciones de este tipo y personalizadas (como la *Signal Processing Toolbox*, por mencionar un ejemplo), pero también brinda la posibilidad de crear aplicaciones propias, incluyendo las interfaces de usuario, para que puedan ser utilizadas por otras personas [63].

Una de las aplicaciones más interesantes de *Matlab*, y que se podría complementar perfectamente con el desarrollo de una *GUI*, es el análisis de imágenes. Dicha rama se define como el proceso de extraer información relevante de imágenes, tal información bien puede ser la búsqueda de formas, el conteo de objetos, la identificación de colores o la medición de propiedades de los objetos. *Matlab* contiene entre sus herramientas, un vasto repertorio de algoritmos estándar de referencia y funciones de visualización para tareas

de análisis de imágenes, como se mencionó más arriba, pues se puede echar mano del análisis estadístico y la clasificación de propiedades. [59]

### 9.3. Plataforma de captura de imágenes

Siguiendo un esquema similar al presentado en la Figura 8.4, se agrupó la cámara, con la identificación de que el armado de sus elementos fue el siguiente:

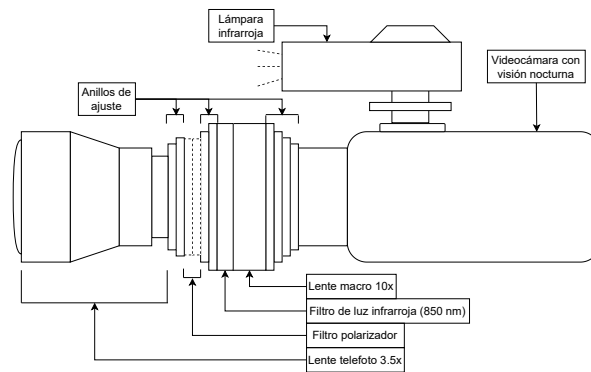


Figura 9.1: Esquema del armado de la cámara.

La razón de los distintos elementos se describe a continuación:

1. Videocámara con visión nocturna: es imprescindible que la cámara cuente con dicha tecnología debido a que le permite captar la luz infrarroja, misma que, como se menciona en [22], no estimula a la pupila y se puede obtener su medida sin que se encuentre más dilatada de su circunstancia normal. Como nota adicional, la distancia focal de la cámara es de  $f = 7.6 \text{ mm}$  en tanto que su apertura máxima es de  $F/3.2$ .
2. Lámpara infrarroja: esta lámpara es para iluminar el rostro del participante de modo que pueda ser captado sin luz externa que pudiera afectar (deformar, principalmente) a la región de interés (los ojos, con reflejos provocados por luz natural). Dicho de otra manera, iluminar el rostro con luz infrarroja, permite que este se vea con la visión nocturna y a pesar del filtro infrarrojo.

3. Anillos de ajuste: estos instrumentos son para adaptar lentes con diámetros distintos al que presenta la cámara por defecto: el principal motivo por el que se usaron fue para adaptar el lente infrarrojo (difícil de conseguir y más para un diámetro tan pequeño como el de la cámara utilizada) y el lente polarizador.
4. Lente macro 10x: su fin es la de compensar las distancias focales que se producen debido a los anillos de ajuste y no perder el enfoque de la imagen.
5. Filtro IR850: este filtro es para dejar pasar la luz infrarroja con una longitud de onda de  $850\text{ nm}$ , se optó por esta longitud debido a que se encuentra un tanto alejada del rojo, pero no demasiado para no percibir la luz de las lámparas de infrarrojo comunes (con longitud de onda mínima de  $680\text{ nm}$ ).
6. Filtro polarizador: este filtro juega con la polaridad de la luz y su orientación, de modo que bloquean la luz con cierta inclinación, dependiendo del ajuste del usuario, el principal uso es para atenuar aún más los reflejos de luz que se pueden percibir en las pupilas (elemento que siempre estará presente dado que es la parte que absorbe la luz que recibe el ser humano).
7. Lente telefoto 3.5x: es empleado para realizar la función de acercamiento (*zoom*, en inglés); con esta videocámara no se utiliza el acercamiento que incluye, debido a que únicamente cuenta con uno de tipo digital, el cual no es uno como tal, sino un agrandamiento de la imagen que percibe la lente.

Además de este equipo se utiliza una lámpara infrarroja adicional a manera de luz de fondo, esto es para compensar los reflejos y las sombras que pudiesen presentarse en el rostro y, principalmente, en las pupilas; este elemento se coloca a 2 metros de distancia, orientada a un ángulo de  $40^\circ$ , considerando

como 90° el frente del participante y 0° su lado derecho. Respecto a la altura, se coloca apuntando a unos -45° respecto al eje de la lámpara.

Retomando el apartado de los costos, la construcción de esta plataforma resultó en lo mostrado en el Cuadro [9.1](#).

Cuadro 9.1: Lista de precios de la plataforma experimental

| Artículo   | Año de adquisición | Proveedor            | Costo               |
|--|--------------------|----------------------|---------------------|
| Videocámara con visión nocturna (24 MP, 1080p)<br><i>MixMart</i> | 2020               | <i>Amazon</i>        | <b>110 dólares.</b> |
| Reflector infrarrojo 96 LEDs                                     | 2020               | <i>Mercado Libre</i> | <b>32 dólares.</b>  |
| Lámpara infrarroja <i>IR Torch ORDRO</i>                         | 2020               | <i>Mercado Libre</i> | <b>14 dólares.</b>  |
| Filtros infrarrojos <i>NEEWER*</i> (IR720, IR760, IR850, IR950)  | 2021               | <i>Amazon</i>        | <b>40 dólares.</b>  |
| Lente telefoto 3.5x <i>Polaroid Studio</i>                       | 2021               | <i>Amazon</i>        | <b>62 dólares.</b>  |
| Anillos de ajuste <i>XCSOURCE</i>                                | 2021               | <i>Mercado Libre</i> | <b>15 dólares.</b>  |
| Lente macro 10x <i>NEEWER</i>                                    | 2021               | <i>Amazon</i>        | <b>19 dólares.</b>  |
| Filtro polarizador <i>Schneider Optics XS-PRO B+W</i>            | 2021               | <i>Amazon</i>        | <b>73 dólares.</b>  |
| <b>Total</b>   | -                  |                      | <b>365 dólares.</b> |

\*Sólo se requirió del filtro *IR850*, no obstante, la única manera de adquirirlo en el momento fue mediante el paquete de los cuatro filtros, por lo tanto,

es posible que al comprar sólo el filtro de 850 nm, este tenga un precio más reducido.

**NOTA:** No se tiene ninguna relación de interés ni de patrocinio con las plataformas de compra-venta descritas en el apartado de “Proveedores”, se adquirieron los productos en dichos lugares debido a la dificultad de los traslados para acudir a tiendas físicas debido a la contingencia generada a raíz del virus SARS-CoV-2.

En este sentido, la plataforma de captura de imágenes está entre el rango de precios de pupilómetros económicos como el *Colvard Oasis 0401A* o el *Procyon P2000*, considerando, por supuesto, que estos se consigan en mercados de segunda mano.

No se toma en cuenta la computadora, dado que el pupilómetro puede funcionar en cualquiera que sea compatible con el programa *MATLAB*, en el caso de las pruebas, dado que, un objetivo a lejano plazo, fuera del alcance de este trabajo, es poder exportar una interfaz de usuario que se pueda ejecutar en cualquier equipo de cómputo que reúna un mínimo de requisitos de procesamiento, siendo que una gran parte de los oftalmólogos cuentan con una computadora de gama media en sus consultorios.

## **9.4. Participantes**

Serán utilizadas bases de datos generadas por especialistas. Se prevé que las bases estén compuestas por personas de sexo indistinto en un rango de edad de entre los 10 y los 30 años que se encuentren libres de padecimientos oculares.

## **9.5. Consideraciones éticas**

El trabajo se basa en el procesamiento de imágenes, por lo que la intervención de personas será únicamente al recabar las bases de datos, las cuales serán formadas por la Dra. Danjela Ibrahimy en un consultorio dedicado, con

ambiente controlado, siguiendo las medidas clínicas pertinentes para garantizar la salud de los participantes durante la captura de imágenes, proceso que se realizará con el total consentimiento de los voluntarios.

No se realizarán pruebas directas sobre humanos u otros seres vivos que puedan poner en peligro su integridad y su participación se verá reducida al mínimo necesario.

En cuanto al pupilómetro, éste se encontrará protegido mediante aislamiento eléctrico en sus componentes para evitar daños tanto al investigador como a quien lo analice y se operará sólo en condiciones idóneas donde no exista riesgo para la salud de ninguna persona o ser vivo, incluido el investigador.

El proyecto estará financiado por la beca de manutención de CONACYT, sin existir conflicto de intereses.

Se limitará la cantidad de residuos electrónicos al mínimo, además de reutilizar la mayor parte de los mismos bien sea en actividades del proyecto o en otros proyectos. Se garantizará la nula generación de residuos químicos, bioquímicos o radiactivos, durante la realización del proyecto. Se trabajará en la optimización del consumo de energía eléctrica, de modo que éste sea reducido al mínimo. Se seguirán al pie de la letra las normas internas de cualquier laboratorio o estudio en el que se trabaje con el pupilómetro, para minimizar el riesgo de incidencias y/o accidentes.

Para las pruebas con pacientes se seguirán todos los principios que indica el código Helsinki, bajo el consentimiento de los participantes y/o tutores; además, a éstos se les informarán las actividades a realizar en todo momento, así como los fines para los cuales serán utilizados los datos recabados.

## **9.6. Consideraciones clínicas**

Este apartado refleja la forma en cómo se realizó la captura de imágenes, incluyendo todas las consideraciones relacionadas al trato de los participantes,

al acondicionamiento del espacio, y a los pasos seguidos para llevar a cabo la recabación de datos, tomando siempre como referencia el material mostrado en la sección de "Plataforma de captura de imágenes".

### **9.6.1. Procedimiento de adquisición de imágenes**

El proceso sigue los pasos presentados a continuación:

1. Se prepara el entorno de captura de imágenes: se monta el equipo de la sección anterior en su lugar correspondiente, tal y como se muestra en la Figura 8.4.

En este punto el participante aún no se instala en la silla, asimismo, el armado y la colocación del equipo será realizada enteramente por los investigadores y colaboradores, por lo que el participante sólo participará en la captura de imágenes.

Como nota complementaria: la habitación no quedará en completa oscuridad, sino a luz ambiente, considerando estos bloqueos de fuentes externas.

2. El participante llenará el formulario de recopilación de información útil para el estudio.
3. Se le indicará al participante la posición en donde se le tomarán las fotografías (en la silla).
4. Se cerrará el paso, en la medida de lo posible, de toda fuente de luz natural exterior, como ventanas, tragaluces o puertas, mediante telas, de forma que el aire pueda seguir circulando y que la temperatura en la habitación no aumente.
5. Se realizarán ajustes de altura a la cámara y/o a la silla para poder capturar las imágenes con el fin de evitar que el participante, adopte posturas incómodas.

6. Se solicitará al participante retirarse cualquier accesorio de la cara que pudiera obstruir sus ojos, accesorios como anteojos (de cualquier tipo), cachuchas, gorras, principalmente.
7. El operador de la cámara le preguntará al participante por su estado actual, y para verificar que se encuentra listo para la captura de imágenes.
8. Se procede a tomar las fotografías al participante, primeramente, en total serán 6 sin errores: entiéndase como “error” algún parpadeo del participante, un movimiento repentino del participante (un espasmo, primariamente de algún párpado), un desenfoque de la cámara, la intromisión de cualquier agente externo en la imagen (como algún insecto o partícula flotante).
9. Se le brinda un breve descanso al participante, para evitar resequedad en sus ojos o incomodidad.
10. En este punto se procede con la captura del video de no más de 60 segundos, para esta actividad, se le solicita al participante que observe atentamente un objeto específico, durante el lapso anteriormente mencionado, en este caso el participante puede parpadear o girar los ojos (siempre que vuelva a mirar hacia el objeto indicado), y se es más permisivo con los “errores” comentados en el paso 8.
11. Por último, se procede a preguntar, de manera verbal, al participante sobre sus sensaciones durante el proceso de captura de imágenes, en especial se busca por malestares y retroalimentación para mejorar la experiencia de los participantes. Como nota adicional sobre este paso, en esta entrevista se grabará únicamente el audio, para transcribir, de ser necesario, algunos comentarios puntuales, que se consideren vitales para la mejorar de la obtención de imágenes.



### **9.6.2. Consideraciones clínicas**

Sobre las consideraciones clínicas, éstas están desglosadas en los siguientes puntos, en aras de preservar la integridad de todos los participantes:

- Durante todo el evento de adquisición de imágenes estará presente un oftalmólogo, quien velará por el bienestar del participante y quien puede tratar tanto malestares como aclarar dudas relacionadas con la visión y posibles problemas surgidos durante esta participación.
- El participante podrá solicitar descansos en cualquier instante en que lo desee o requiera, incluso, podrá solicitar la detención total de la adquisición de imágenes.
- El participante se encontrará acompañado en todo momento por su tutor, para verificar que el proceso se cumpla a cabalidad como lo refieren todos los documentos firmados: “Carta de consentimiento informado para tutores menores de edad”, “Carta de asentimiento informado para menores de edad”, “Carta de confidencialidad de información”, también para cuidar el estado del (la) menor, en especial si tiene alguna discapacidad.
- Si el participante reporta algún malestar, se procederá a detener totalmente la adquisición de imágenes y se le realizará una evaluación para descartar algún mal generado por este proceso.
- Para evitar malestares físicos o psicológicos, la sala en donde se tomarán las imágenes será amplia, con unas dimensiones no menores a 3 metros por 5 metros, de esta manera se asegura que no habrá problemas de espacio y de hacinamiento.
- La distancia mínima entre la cámara (y la respectiva iluminación) y el paciente será de 1 (un) metro, para evitar fatiga ocular o agobio por la temperatura del equipo en el participante.

- En la sala, además del participante y su tutor, sólo habrá un máximo de 3 colaboradores (incluyendo el investigador responsable del proyecto: Francisco Miguel García Herrera y al oftalmólogo colaborador), en condiciones normales; no obstante, en condiciones como la pandemia de COVID-19, este número de colaboradores serán 2 (el oftalmólogo y el investigador responsable).
- El uso de luz roja ha ido en aplicaciones como fototerapia, incluso existen estudios que indican que puede proteger los ojos ante los efectos de envejecimiento, en periodos no mayores a 3 minutos al día [64], aunque no ha sido del todo estudiada en humanos, incluso se siguen haciendo estudios para generar más resultados que avalen estos estudios. Por su parte, la luz infrarroja también se ha aplicado en una terapia de luz pulsada intensa, utilizada en no más de 4 veces por año (en sesiones de 10 minutos), siendo una terapia aprobada por la FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos), para uso principalmente cutáneo, no obstante, también se ha aplicado en los párpados [65]. De la misma forma, se han hecho estudios en los que se explica que se ha utilizado este tipo de luz directamente sobre los ojos como tratamiento para aliviar lesiones cerebrales y combatir la neuro-degeneración, sin reportar efectos secundarios, aunque no recomiendan su aplicación inmediata, debido a que puede ocasionar enrojecimiento, mareos, entre otros males [66]. Por tal motivo, la luz infrarroja en este proceso nunca se usará de forma directa, es decir, nunca apuntará hacia la pupila del participante directamente y la exposición total no será por más de 2 minutos cronometrados.

## 9.7. Modelado del proceso

La propuesta del proyecto está planteada como una investigación teórica, con una ligera parte aplicada, que requiere de investigación experimental y

cuantitativa. Es aplicada dado que se persigue la funcionalidad del prototipo, de tal manera que sirva de base para realizar pruebas en bases de datos validadas, o bien se desea construir un equipo definitivo para poder probar con pacientes reales. Es teórica dado que se ahondará en la investigación y desarrollo de un algoritmo basado en morfología matemática para el procesamiento de imágenes, con énfasis en el diámetro de Feret, por lo que girará entorno a la proposición y depuración del mismo, así como a la comparativa entre los resultados y el rendimiento de diversos operadores morfológicos.

La parte experimental y cuantitativa recae en la necesidad de realizar pruebas para perfeccionar el pupilómetro, con testeos que reflejen una convergencia hacia la consecución de un comportamiento deseado y estandarizado, que sea confiable sin importar las circunstancias normales a las que se exponga el prototipo.

Para poder delimitar los alcances y limitaciones del pupilómetro, éste debe cumplir con un proceso base, sobre el cual se construirá el mismo. El proceso base que seguirá el prototipo para cumplir con su cometido es el siguiente:

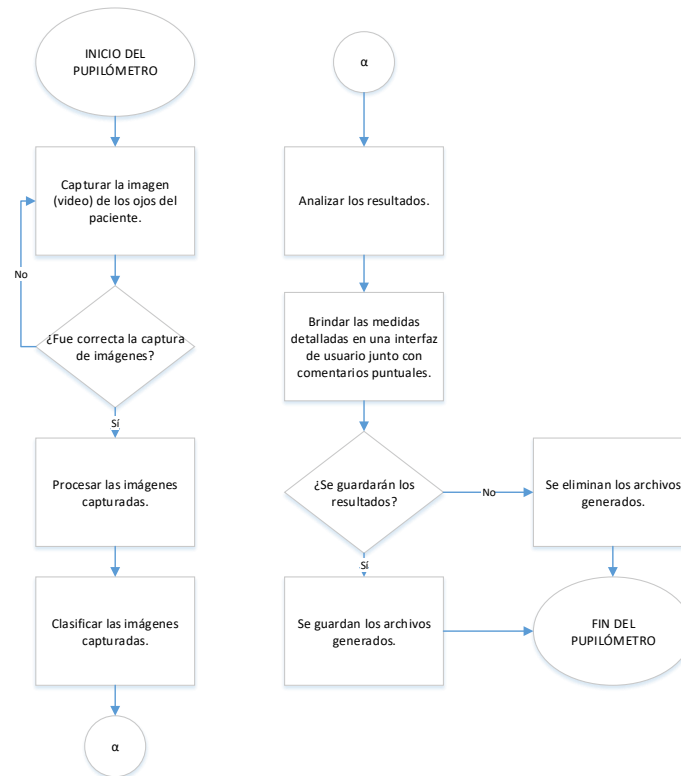


Figura 9.2: Proceso a seguir por parte del pupilómetro.

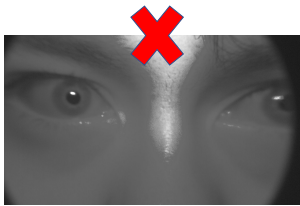
Esta es el procedimiento general sobre el que se basa el funcionamiento del pupilómetro.

La decisión que se realiza para determinar si la captura de imágenes fue correcta o no, se basa en los siguientes criterios:

1. Ambas pupilas deben aparecer en su "totalidad.<sup>a</sup> cuadro, entendiéndose como "totalidad.<sup>a</sup> que la parte del ojo en donde se encuentra la pupila salga a cuadro, independientemente de si el párpado o las pestañas interfieren con la visión de esta, siempre que no se pierda más del 60 % de su superficie (que siga siendo un círculo).
2. El reflejo residual no debe abarcar más del tamaño de la pupila, entendiéndose por reflejo residual al brillo de la luz infrarroja que persiste tras los filtros, el cual se percibe en las pupilas.

3. Que en la imagen no existan indicios de movimiento ocular, los cuales difuminen la forma de la pupila en ninguna medida.
4. No debe haber presencia de elementos ajenos al rostro de la persona, entre estos elementos se incluyen: partículas de polvo, suciedad, agentes externos (dígase moscas).
5. Las imágenes deben tener enfoque, de modo que se puedan observar con claridad los distintos elementos del rostro.

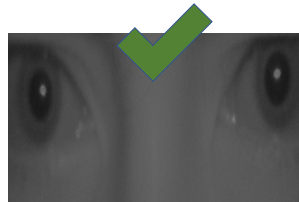
Como ejemplo de selección de imágenes se tiene la Figura 9.3:



(a) Imagen descartada por la destrucción de la pupila derecha y el nulo control del brillo



(b) Imagen descartada por la falta de enfoque y problemas de iluminación.



(c) Imagen que cumple con los parámetros.

Figura 9.3: Selección de imágenes.

La imagen vista en la Figura 9.3c cumple principalmente porque, además de tener buena iluminación, el brillo remanente se ubica al centro de las pupilas, de modo que no genera demasiada destrucción en esta región de interés. Por supuesto que esta calidad de imagen es la mejor obtenida posible con el equipo del que se dispuso para la plataforma de captura de datos.

Es importante mencionar que la clasificación se realiza en función del tamaño y la relación que existe entre ambas pupilas, atendiendo al criterio de la

pupila patrón.

## 9.8. Modelado del procesamiento de imágenes

Para poder determinar la medición de la pupila, se debe seguir un algoritmo simplificado, diseñado con el objeto de eficientar procesamiento de imágenes, el cual está ejemplificado en la siguiente figura:

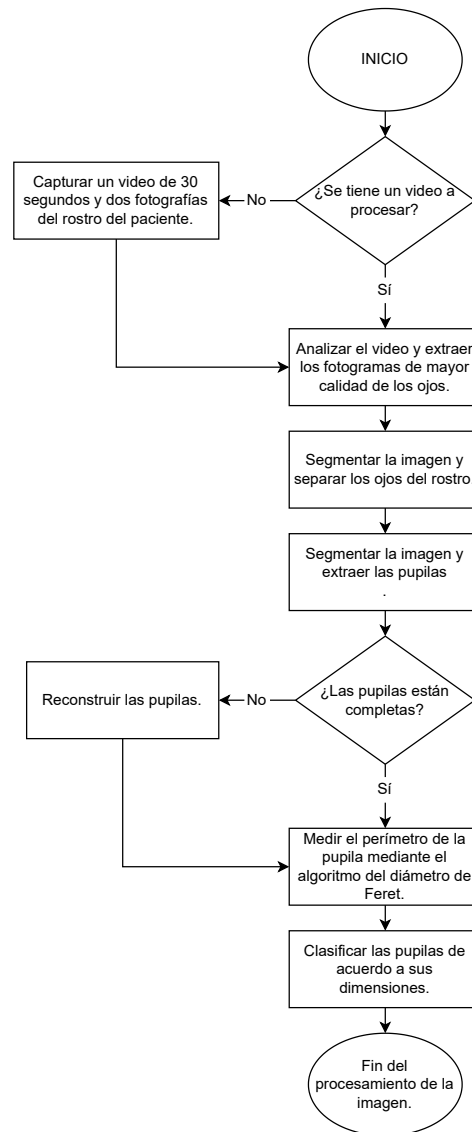


Figura 9.4: Diagrama base del DIP.

Se destaca que el seguir este procedimiento garantiza el ahorro de tiempo para el investigador de seleccionar las imágenes de más resolución con lo que se obtiene una ventaja a la hora de realizar una medición más precisa de la pupila.

Como nota aclaratoria: los primeros dos pasos, referentes a la ausencia o presencia de video e imágenes, se realizan de forma manual, es decir, se capturan imágenes de la forma en cómo se han descrito en los apartados anteriores, referentes a consideraciones clínicas y éticas. El proceso de extracción de fotogramas también es realizado de forma manual, así como el recorte de dichos fotogramas, en este último punto, se busca con preservar únicamente la parte del rostro, sin los bordes negros generados por los anillos de ajuste.

## **9.9. Proceso de segmentación de los ojos**

En este apartado se explica el proceso seguido para sustraer los ojos de una imagen completa, con todas las operaciones matemáticas, así como la solución propuesta, creada a partir de la última apertura.

Al tener un ambiente controlado para la captura de imágenes, el primer paso fue el de mejorar el contraste en las imágenes, así como el brillo, para lograr resaltar a los ojos, esto principalmente para compensar la inherente oscuridad presente en las imágenes tomadas (véase Figura 9.3c). Dicho paso se consiguió mediante el uso de operaciones aritméticas comunes para el procesamiento de imágenes: suma, multiplicación, potencia.

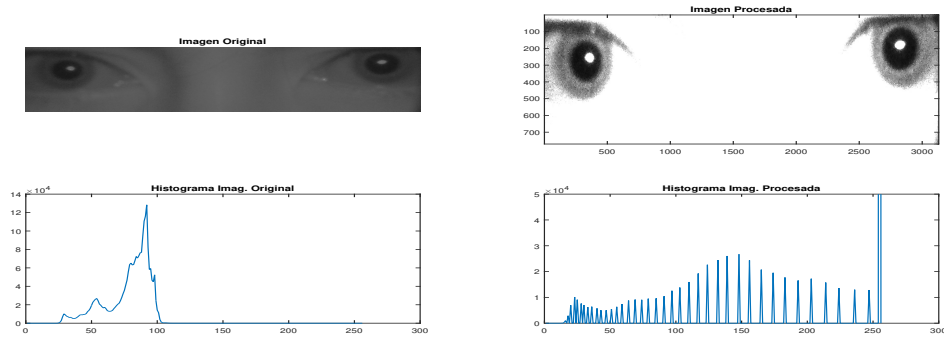


Figura 9.5: Preprocesamiento de imágenes.

En la Figura 9.5, a la izquierda, se observa la imagen original junto con su histograma; el objetivo principal fue el de resaltar la parte de los ojos, como se puede ver en el histograma de la parte derecha y en su respectiva imagen resultante, para así aliviar la cantidad de elementos a procesar, debido a que la última apertura (el operador residual, no la función asociada) se encarga de eliminar los máximos de la imagen que se ha de procesar, siendo, para este caso la imagen de la derecha.

Se determinó para todas las imágenes que el segundo valle que se presenta en el histograma correspondía con ambos elementos (los ojos y las pupilas).

Una vez preprocesada la imagen se le aplicó el operador de la última apertura, de forma directa, (véase (8.21)), para generar un conjunto de residuos, no como tal el supremo, de modo que se tiene el conjunto de aperturas:

$$\Upsilon(f)(x) = \{H : H = (\gamma_i(f) - \gamma_{i+1}(f))(x) \wedge H \notin \emptyset\} \quad (9.1)$$

Con este conjunto se puede dar paso a la Última Apertura Única, expresada con  $\Upsilon'$ , que consiste en obtener el supremo de cada uno de los píxeles que se encuentran en todo el conjunto de la última apertura  $\Upsilon$  de modo que su respectiva definición:

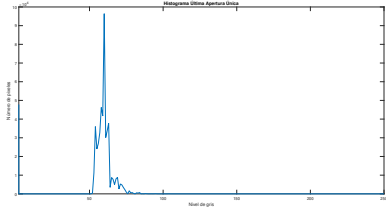
$$UOU'(x) = \{max(x) : x \in \Upsilon(f)(x) \wedge x \geq 0\} \quad (9.2)$$



Al aplicar este operador se puede observar una imagen que trabaja con los residuos que se han decidido rescatar (los ojos, principalmente), un ejemplo se muestra en la Figura 9.6.



(a) Resultado de la última apertura única.



(b) Histograma de la última apertura única, correspondiente a la Figura 9.6a.

Figura 9.6: Residuos de la última apertura única.

Si se compara el histograma presente en la Figura 9.6b con el visto en 9.5 (ubicado en la imagen preprocesada), se puede observar una gran compactación de éste último, además de que el número de píxeles incrementó sustancialmente (visible en el segundo pico).

Derivado de esta compactación, se observó que al alcanzar el primer pico en el histograma de la Figura 9.6b, se conseguían rescatar únicamente las pupilas, por lo cual se procedió a aplicar un rescate para detectarlo y salvarlo únicamente, de modo que el resultado de dicho proceso se puede ver, por lo general, en las pupilas acompañadas de residuos de otras partes, como se aprecia con la Figura 9.7

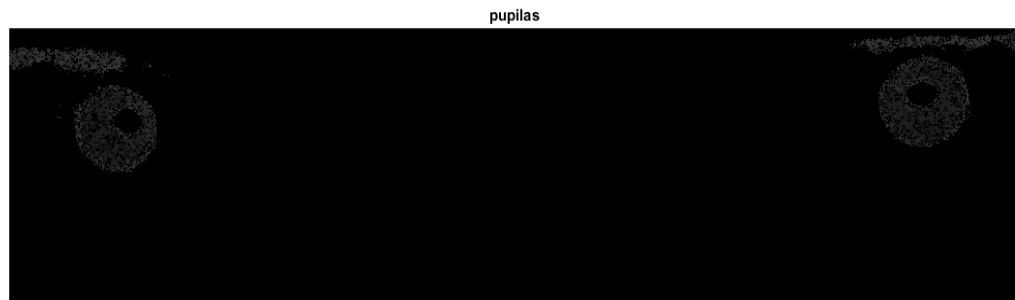


Figura 9.7: Remanente de la última imagen, perteneciente al primer pico.

Dado que lo que se busca para este proyecto son solo las pupilas, se eliminan las estructuras ajenas a esta, para ello se echa mano de la dilatación geodésica, vista en (8.23), pero se debe determinar el marcador, para obtenerlo, se empleó el siguiente razonamiento: a raíz de un centro se comprueban cuatro puntos, si el centro se encuentra dentro de esos cuatro puntos, entonces quiere decir que se ha detectado una estructura trigonométrica, (se precisa un círculo o figura similar) que se debe salvar.

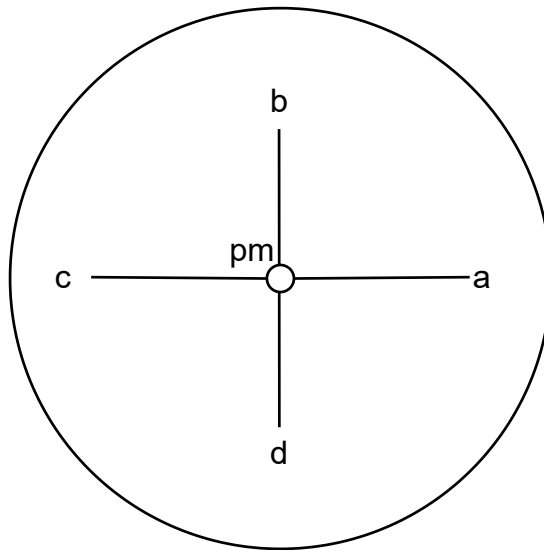


Figura 9.8: Ejemplificación de la elaboración de un marcador.

Es así que un conjunto de píxeles formará un marcador bajo la siguiente definición:

$$M(x) = \{x : pm \in P \leftrightarrow a, b, c, d \in P \wedge P \subset UOU(x)'\} \quad (9.3)$$

Donde  $P$  es la pupila. Sin embargo, debido a que es posible que uno (o la totalidad) de los elementos de  $M$  caiga en alguna región interna cortada por el brillo, de tal suerte que el conjunto de marcadores no podrían tener efecto en la reconstrucción, para evitar este problema, se decide efectuar una serie de dilataciones consecutivas, hasta asegurarse que el marcador sí forme parte de  $P$ . Así, la máscara  $g$  es:

$$g(x) = \lim_{n \rightarrow M} \delta_B^n(M)(x) \quad (9.4)$$

Donde  $M$  tiende a ser un número finito. Con esto, se considera a la reconstrucción por dilatación geodésica, vista en (8.25). No obstante, se debe recalcar que el tamaño del elemento estructurante se obtiene a partir de un análisis de índices volumen realizado por medio de las últimas aperturas, tomando en cuenta el tamaño del disco que más datos aporta, a razón de de la imagen original:

$$\text{índice}_{UO} = \frac{(\gamma_i(f) - \gamma_{i+1}(f))(x)}{f(x)} \quad (9.5)$$

Como comentario adicional, el elemento estructurante  $B$  utilizado es uno con forma de disco. Se muestra como ejemplo de un análisis de índices el siguiente, que corresponde con la Figura 9.5 (superior, derecha).

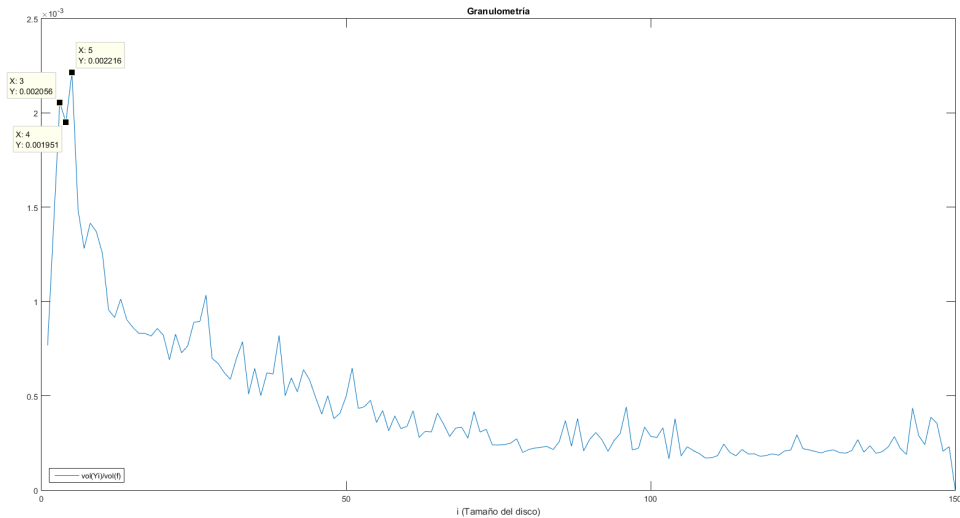


Figura 9.9: Contribución de los discos en términos de granulometría.

De la Figura 9.9 se pueden apreciar que son los discos de tamaño  $i = 3$  e  $i = 5$  los que más información aportan, por lo que se consideran los ideales al momento de trabajar con operadores morfológicos como la dilatación y la erosión.

Se da un último paso que consiste en rellenar los huecos internos que pudieran darse por el brillo presente en las pupilas (véase Figura 9.7), que en algunos casos pueden destruir la estructura.

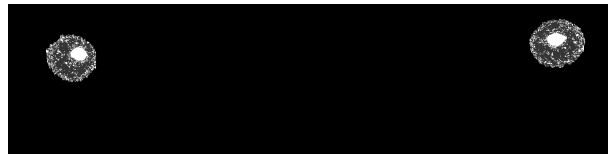
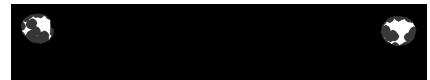


Figura 9.10: Relleno de las pupilas.

El realizar este paso permite rescatar una mayor superficie de las regiones de interés, es así que una sucesión de dilataciones y erosiones (filtrado deslizante), puede ayudar a recuperar una buena porción de imágenes como la que se muestra en la Figura 9.11.



(a) Relleno de pupilas.



(b) Resultado del filtrado deslizante de apertura.



(c) Pupilas recuperadas.

Figura 9.11: Resultados de aplicar dilataciones y erosiones sucesivas.

Como se aprecia entre la Figura 9.11a y Figura 9.11b, se cubre una super-

ficie ligeramente mayor, con lo que la superficie recuperada se incrementa, en algunos casos la recuperación fue de hasta 20.24 % comparada con la superficie que se consigue sin el filtro.

Estos son los pasos que se realizan para rescatar y recuperar la pupila. En el siguiente apartado se abordan las mediciones.

## 9.10. Proceso de medición

Los dos procesos de medición que se siguieron en este proyecto fueron centrados en la superficie de la pupila: conteo de píxeles y diámetro de Feret. En tanto, para medir el perímetro, se utiliza una transformada de tipo *tophat* (*tpw*).

### 9.10.1. Conteo de píxeles

Este método consiste en, como el nombre indica, contar los píxeles que no sean cero, de cada pupila por separado, cuando ya están extraídas, como en la Figura 9.11c. En términos de definición:

$$\text{Área}Cx_{(\text{conteo})(px)} = \sum x \leftrightarrow x > 0 \wedge x \in P \quad (9.6)$$

Donde  $\text{Área}Cx_{(\text{conteo})(px)}$  es el área del círculo derecho (*Cd*) o izquierdo (*Ci*), según el caso.

### 9.10.2. Algoritmo de diámetro de Feret

Tomando como referencia el concepto descrito en su correspondiente sección, el diámetro de Feret se utilizó de la siguiente manera: 8 diámetros se generan con las direcciones indicadas en la Figura 9.12.

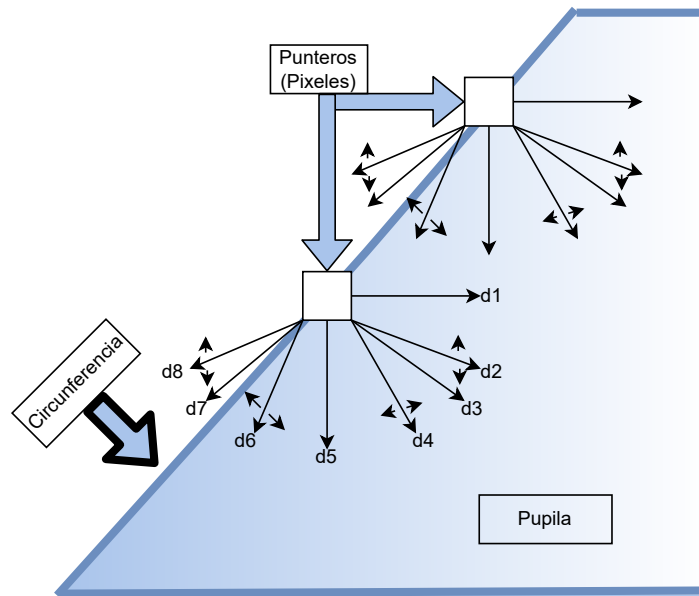


Figura 9.12: Detección de diámetros.

El puntero recorre todo el contorno de la pupila y en cada píxel que pertenece al mismo, mide la cantidad de píxeles que hay hasta el otro extremo del contorno de la pupila, en cada una de las direcciones, dicha información, si es la primera corrida, la guarda; en caso de ser la segunda, o la última, la compara con la iteración anterior para cada dirección, de este paso, cambiará el valor del diámetro sólo si este es mayor que el valor anterior. Como nota aclaratoria: el proceso de conteo de píxeles sólo lo hace sobre la superficie de la pupila, verificando si hay un valor en la nueva posición a comprobar.

No obstante, la dirección de las diagonales “d2”, “d4”, “d6” y “d7” tienen una particularidad y es que estas direcciones se mueven entre los  $90^\circ$  que tienen de margen, para las dos primeras diagonales “d2”, “d4”, sería el espacio que existe entre “d1” y “d5”, lo que diferencia a las dos líneas es que la variación de su ángulo varía de acuerdo al cambio que hay entre renglones y columnas para la comprobación en del siguiente píxel: en perspectiva: la diagonal “d3” se mueve en una dirección de  $45^\circ$ , esto es; por cada unidad desplazada hacia la derecha, hay un desplazamiento hacia abajo. En el caso

de “d2”, este desplazamiento es de la siguiente forma: siempre hay un desplazamiento en una unidad hacia la derecha, pero sólo habrá un desplazamiento hacia abajo cada que se cumpla cierta cantidad de desplazamientos hacia la derecha, por ejemplo: por cada 4 desplazamientos a la derecha hay uno hacia abajo. Por otro lado, para “d4” sucede lo contrario, en el conteo siempre hay un desplazamiento hacia abajo en una unidad, y sólo hay uno hacia la derecha cada cierta cantidad de desplazamientos hacia abajo. ¿Cómo se determina si debe haber un desplazamiento hacia abajo (caso “d2”) o hacia la derecha (para “d4”)? Eso lo determina este algoritmo, cuando logre encontrar la diagonal “d2” más larga con cada combinación de variaciones, es decir, este parámetro también se varía una cierta cantidad de iteraciones hasta dar con las diagonales “d2”, “d4”, “d6” y “d7” más largas, esto para cada posición del puntero en cada uno de los píxeles de los contornos de la pupila.

Es importante resaltar que tanto “d2” como “d4” obtuvieron muy pocas veces el mismo por el ángulo de variación y la naturaleza de recorrer figuras a través de sus píxeles, dicho de otra manera, se consiguieron 8 diagonales distintas, en un dato más preciso, en alrededor de 88 % del total de pupilas analizadas.

El proceso descrito para este algoritmo, como es de esperar, consume muchos recursos y puede requerir de un tiempo considerable, dependiendo de los factores: tamaño de la pupila (cantidad de píxeles a contar por cada diagonal) y morfología de esta (cantidad de posiciones en las que se va a colocar el puntero).

Para aligerar la carga computacional se ha decidido sólo conservar la mitad de las diagonales posibles, debido a que al recorrer todo el contorno, carece de sentido contar en un sentido y en el otro, ya que se llegarían a obtener un duplicado exacto de las diagonales que se obtienen de esta manera.

Para encontrar el área mediante esta técnica se tomó en cuenta un promedio consistente entre los 6 diámetros más cercanos al promedio total, es decir, primero se obtuvo un diámetro promedio entre los 8 diámetros obtenidos pa-

ra cada pupila, luego se descartaron los dos diámetros más alejados a dicho promedio, para generar uno nuevo a partir de los 6 que se conservaron. Cabe resaltar que en el 100 % de los casos los dos diámetros que siempre se descartaron fueron  $d3$  y  $d7$  (véase Figura 9.12), de este modo, el área del círculo por medio del diámetro de Feret se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Área}Cx_{(Feret)(px)} = \pi * \left( \frac{d1+d2+d4+d5+d6+d8}{2} \right)^2 \quad (9.7)$$

Donde  $\text{Área}Cx_{(Feret)(px)}$  es el área del círculo derecho ( $Cd$ ) o izquierdo ( $Ci$ ), por Feret, según el caso.

### 9.10.3. Medición del área de la pupila a partir del perímetro

El método consiste en obtener en primera instancia el perímetro de la pupila recuperada (véase Figura 9.11c), por medio de un gradiente interno, tomando para ello a 8.30, posteriormente, se obtiene la medida en píxeles de este parámetro. A partir de la relación trigonométrica existente entre el perímetro y el radio, se puede calcular este último mediante:

$$rx_{px} = \frac{Cx_{px}}{2\pi} \quad (9.8)$$

Donde  $Cx_{px}$  es la circunferencia de la pupila izquierda ( $Ci$ ) o derecha  $Cd$ , según el radio a buscar ( $ri$ , izquierdo, o  $rd$ , derecho), todo en píxeles. No obstante, se dio la necesidad de requerir sólo el 55 % de los píxeles de la circunferencia, esto debido a que el contorno no tenía por grueso un píxel, sino que este, en ciertas regiones tenía un grosor de hasta de tres o cuatro píxeles, por lo que el contorno no era uniforme. Un estudio probabilístico basado en ANOVA arrojó como resultado que, en promedio, se tenían hasta un 110 % extra de píxeles, respecto a lo que debería de tener el contorno. ¿Por qué era necesario un contorno de grosor de un píxel? Porque sólo era necesario saber cuánto medía la circunferencia, sin sesgos. De esta forma, la ecuación 9.8



pasó a ser:

$$rx_{px}(ajustado) = \frac{Cx_{px}}{2\pi} \quad (9.9)$$

Ya con el valor de  $rx_{px}(ajustado)$  fue posible obtener el área a través del perímetro, con el uso libre de la analogía de la fórmula trigonométrica para el área del círculo:

$$\text{Área}Cx_{(perímetro)(px)} = (\pi)(rx_{px}(ajustado))^2 \quad (9.10)$$

Fue con estas técnicas con las que se procedió al análisis de los resultados de las pupilas, mismo que será discutido en la siguiente sección.

# Capítulo 10

## Resultados

La presentación y la discusión de resultados se hará de la siguiente manera: se eligieron cinco casos que ejemplifican varias situaciones comunes que se presentaron a lo largo de la adquisición de imágenes; en cada uno de estos casos se discute la segmentación de las pupilas, a grandes rasgos el cómo fue que resultaron afectadas por las máscaras, así como sus histogramas, señalando los puntos en común con los demás casos y sus particularidades; también se abordan los resultados de sus mediciones. En un último apartado se habla de las condiciones generales.

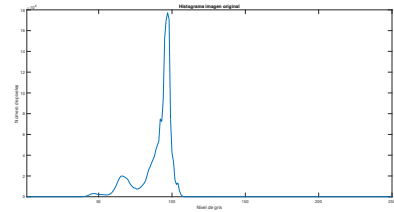
### 10.1. Caso 1: pupilas completas

**Descripción del caso:** las pupilas corresponden a una persona del género femenino de 50 años, sin historial médico previo; fueron capturadas a una distancia de 50 cm, respecto a la posición de la cámara; en condiciones de iluminación normales, es decir, en una ambientación que se puede obtener en una habitación cerrada iluminada por luz natural, sin luz del sol incidiendo directamente, en un horario de mediodía.

En la Figura [10.1](#) se puede ver la etapa de pre-procesamiento de la imagen obtenida en cuestión, junto con los dos histogramas, para ejemplificar el primer paso del algoritmo.



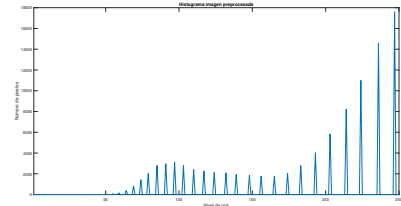
(a) Imagen del primer caso.



(b) Histograma de la imagen original del primer caso.



(c) Imagen pre-procesada del primer caso.



(d) Histograma de la imagen pre-procesada del primer caso.

Figura 10.1: Imagen del primer caso y el resultado del pre-procesamiento, acompañadas por sus histogramas.

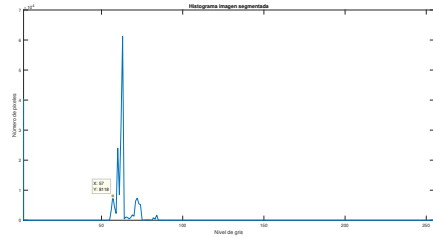
La razón principal del pre-procesamiento que se observa en la Figura [10.1](#) es para reducir el espectro a trabajar dentro de la última apertura, debido a que, dada su naturaleza de operador morfológico que emplea el elemento estructurante, consume bastantes recursos para analizar toda la superficie de la imagen. Siempre manteniendo el área completa de las pupilas, así como del iris.

### 10.1.1. Recuperación de las pupilas

Al aplicar la última apertura única se obtuvo el resultado de la Figura [10.2](#), que sólo obtuvo como salida aquellos elementos que se encontraban en el espectro visto en la Figura [10.1](#).



(a) Resultado de la última apertura única en el primer caso.



(b) Histograma de la imagen mostrada en la Figura 10.2a

Figura 10.2: Efectos de la última apertura única, en el primer caso.

De la Figura 10.2b se puede observar el primer pico que es el límite que se toma para rescatar únicamente la pupila y descartar el resto de residuos del ojo, es decir, también se consideran los valores previos al primer pico. Al tomar tal segmento de la imagen el resultado es el mostrado en la Figura 10.3.

Un aspecto crucial que se realizó fue el análisis granulométrico visto en la Figura 9.9, ya que ayudó a determinar el tamaño estándar del elemento estructurante para todos los operadores, incluido el de la última apertura única. Con dicho análisis el elemento seleccionado fue un disco de tamaño  $i = 3$ . Así fue posible proceder a la recuperación de las pupilas.

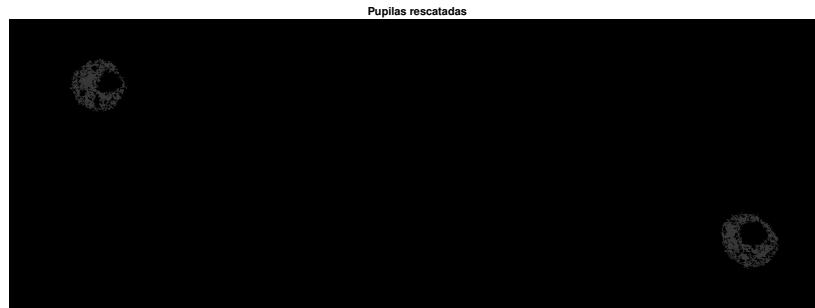


Figura 10.3: Segmentación de las pupilas del primer caso.

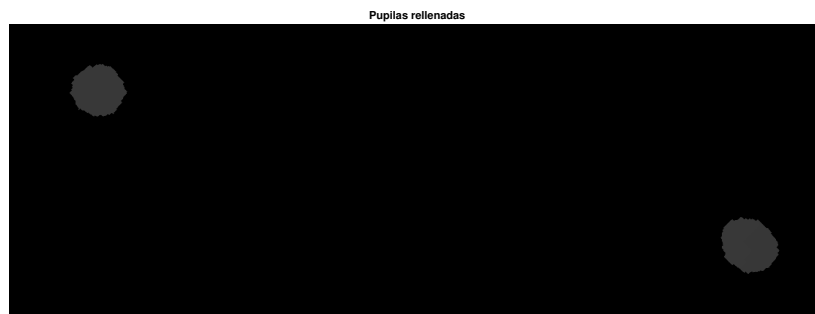
Al observar la Figura 10.3, se puede apreciar que las pupilas fueron rescatadas en una buena porción, lo cual propicia una reconstrucción más sencilla,

de hecho no hubo remanentes u otras estructuras anómalas, por lo que la diferencia entre esta etapa y la reconstrucción geodésica no es perceptible (para despejar el ruido).

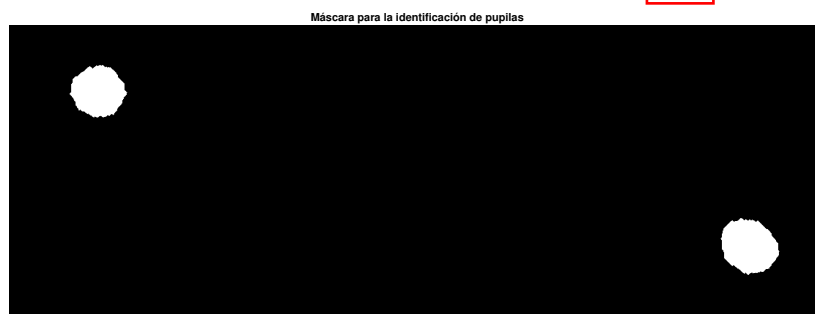
En la Figura 10.4 se puede apreciar la creación de la máscara que servirá para recortar a las pupilas de la imagen original.



(a) La base de las pupilas que se van a rescatar.



(b) Relleno de las base mostrada en la Figura 10.4a.



(c) Máscara creada para el caso 1.

Figura 10.4: Creación de la máscara para el rescate de pupilas, en el primer caso.

De la Figura 10.4a a la Figura 10.4b, el trabajo que se realizó consistió llenar los huecos que se produjeron por el reflejo de luz infrarroja en ambas pupilas, así como la mayor cantidad de los dos huecos (poros o zonas de ceros) que se produjeron por el ruido de la cámara, pero siempre dentro de la base rescatada en 10.4a esto se consiguió mediante filtros consecutivos de dilataciones y erosiones (primero una serie de dilataciones y luego la misma cantidad de erosiones), pero sin caer en el exceso, esto para evitar que las pupilas se puedan mezclar con el ruido (no presente en este caso).

De la Figura 10.4b a la Figura 10.4c se emplea el siguiente proceso: primero se convierte toda la superficie en blancos absolutos (unos o el valor de 255), posteriormente se rellenan los huecos restantes (generalmente las “lagunas” que persisten del reflejo de luz), añadiendo tantos unos como sea necesario al interior de la zona que ya se tiene en la Figura 10.4b, sin emplear ningún operador morfológico, para evitar alterar la superficie. Para este caso en particular, se distingue que este paso se limitó a convertir de escala de grises a binario, dado que no quedaban más huecos por rellenar.

Este caso se puede considerar como ideal: fue posible reducir la cantidad de información a trabajar con el pre-procesamiento, la segmentación de pupilas a partir del resultado de la última apertura fue precisa con el primer pico, debido a que la máscara no requirió de ninguna limpieza de remanentes o ruido que pudiera haberse conservado de la Figura 10.2a, así, al emplear la máscara de la Figura 10.4c como recorte, se pudieron obtener las pupilas, tal y como se muestra en la Figura 10.5.

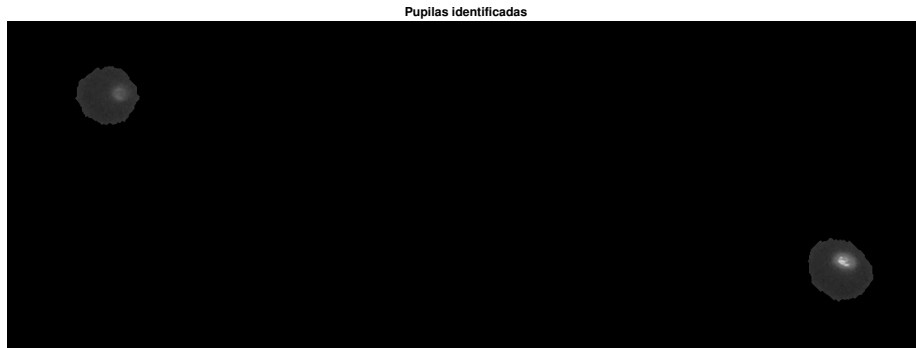


Figura 10.5: Resultado de la obtención de las pupilas en el caso 1.

Con el resultado visto en dicha Figura, es posible continuar con la medición, abordada en el siguiente apartado.

### 10.1.2. Medición de las pupilas

El primer paso de este proceso de medición consiste en identificar los diámetros de Feret atendiendo al funcionamiento visto en la correspondiente sección del algoritmo de diámetro de Feret y representado en la Figura [9.12](#). En el caso 1, los diámetros encontrados fueron los presentados en la Figura [10.6](#).



(a) Diámetros de Feret de la pupila derecha.      (b) Diámetros de Feret de la pupila izquierda.

Figura 10.6: Diámetros de Feret marcados en el caso 1.

Respecto a la presentación de las pupilas, cabe resaltar que la rotulación de las mismas se ha realizado de acuerdo al posicionamiento de estas en el rostro del paciente, es decir, la “pupila derecha” se ubica a la “derecha” del

rostro del paciente, en tanto que la izquierda se ubica en su respectivo lado del rostro y no dependen de la orientación en el presente documento.

Aprovechando el acercamiento en dicha Figura, es posible observar que ninguna de las dos pupilas resultó ser un elemento circular perfecto: este defecto se debe a tres factores principales: la forma del elemento estructurante, es difícil que este sea un círculo perfecto a nivel píxel, además, el tamaño utilizado resultó ser muy pequeño para darle una forma geométrica; el segundo motivo fue el ruido de la imagen: presente por la propia cámara y su resolución, además de la utilización de filtros infrarrojos y las partículas que absorbían la luz de este espectro y que se interpusieron entre la pupila y la cámara; el último motivo es de la morfología de la propia pupila: al ser un orificio de escala milimétrica por el que incide la luz, presenta irregularidades en su contorno, situación que ya ha sido documentada en cirugías como la del tratamiento de la miosis. [67]

Retomando las Figura 10.12a y 10.12b, se destaca que en cada caso se rotularon en rojo todos los diámetros implicados de la misma forma que en la Figura 9.12. No obstante, es importante distinguir que los diámetros difícilmente se encontraron en una misma posición  $(x, y)$ , dado que se trató de encontrar la línea más larga en cada orientación.

Cabe destacar que los diámetros “d2”, “d4”, “d6” y “d8” fueron variando en ángulo, en regiones que se encontraban, respectivamente entre “d1” y “d3”, “d3” y “d5”, “d5” y “d7”, “d7” y “d1”. Así, las medidas que presentaron todos estos diámetros fueron las mostradas en el Cuadro 10.1.



Cuadro 10.1: Medidas de los diámetros en el caso 1

| Pupila izquierda (Figura 10.12b) |                  | Pupila derecha (Figura 10.12a) |                  |
|----------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| Diámetro                         | Medida (píxeles) | Diámetro                       | Medida (píxeles) |
| d1                               | 154              | d1                             | 156              |
| d2                               | 159              | d2                             | 153              |
| d3*                              | 117              | d3*                            | 105              |
| d4                               | 156              | d4                             | 143              |
| d5                               | 149              | d5                             | 143              |
| d6                               | 152              | d6                             | 144              |
| d7*                              | 99               | d7*                            | 103              |
| d8                               | 154              | d8                             | 155              |
| diámetro promedio (Feret)*       | 154              | diámetro promedio (Feret)*     | 149              |
| radio promedio                   | 77               | radio promedio                 | 75               |

*NOTA: para el diámetro promedio no se tomaron en cuenta las diagonales de 45 grados (propias de “d3” y “d7”), debido a que se alejaban del promedio del resto de diagonales y esto interfería con el resultado y la aproximación.*

Con estas medidas, fue posible obtener tanto el área como el perímetro de la pupila, atendiendo para el primer caso a la Ecuación 9.7 y la fórmula matemática para obtener el perímetro de un círculo:

$$\text{Perímetro} = \pi * \text{diámetro promedio (Feret)} \quad (10.1)$$

Tomando el diámetro de la pupila de la cual se quiere conocer el perímetro.

Por otro lado, para la medición del área de las pupilas por medio del conteo de píxeles, simplemente se toma en cuenta a la Ecuación 9.6, a su vez, para obtener el diámetro de ella, se emplea el uso de un despeje de la fórmula del área del círculo:

$$\text{diámetroCx} = 2 * \sqrt{\frac{\text{ÁreaCx}}{\pi}} \quad (10.2)$$

Y a partir de aquí, se llega al perímetro con una fórmula análoga a la vista en la Ecuación 10.1, sustituyendo el diámetro correspondiente.

Para tratar con el contorno detectado de las pupilas, como si de una circunferencia se tratara, se emplean las ecuaciones 9.8, 9.9 y 9.10.

Así, los resultados obtenidos en el primer caso fueron los siguientes: primeramente se muestran los obtenidos para la pupila izquierda (Figura 10.12b) en el Cuadro 10.2, en tanto que después se abordan los obtenidos para la pupila derecha (Figura 10.12a) en el Cuadro 10.3.

Cuadro 10.2: Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 1 (pupila izquierda)

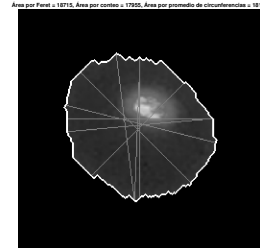
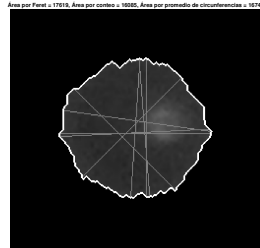
| -              | Método            |                   |                |
|----------------|-------------------|-------------------|----------------|
| Medida         | Diámetro de Feret | Conteo de píxeles | Circunferencia |
| Radio          | 77px              | 76px              | 156px          |
| Diámetro       | 154px             | 152px             | 151px          |
| Área           | 18715px           | 17955px           | 18146px        |
| Circunferencia | 484px             | 478px             | 476px          |

Cuadro 10.3: Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 1 (pupila derecha)

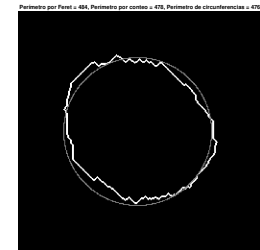
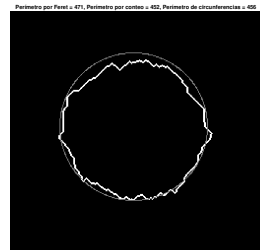
| -              | Método            |                   |                |
|----------------|-------------------|-------------------|----------------|
| Medida         | Diámetro de Feret | Conteo de píxeles | Circunferencia |
| Radio*         | 75px              | 77px              | 73px           |
| Diámetro       | 149px             | 144px             | 145px          |
| Área           | 17619px           | 16805px           | 16742px        |
| Circunferencia | 471px             | 452px             | 456px          |

*\*Debido a que se está trabajando con píxeles es esencial que las cantidades obtenidas sean dadas en números enteros.*

Para ejercicio ilustrativo, se muestra en la Figura 10.7, las pupilas con sus respectivas medidas obtenidas mediante el algoritmo.



(a) Medidas de la pupila derecha en el caso 1, (b) Medidas de la pupila izquierda en el caso 1, perímetro. área.



(c) Medidas de la pupila derecha en el caso 1, (d) Medidas de la pupila izquierda en el caso 1, perímetro.

Figura 10.7: Medidas de ambas pupilas en el Caso 1.

En las Figuras 10.7c y 10.7d es visible la diferencia que existe entre la estimación obtenida mediante el algoritmo de segmentación y un círculo generado a partir de la función trigonométrica de un círculo.

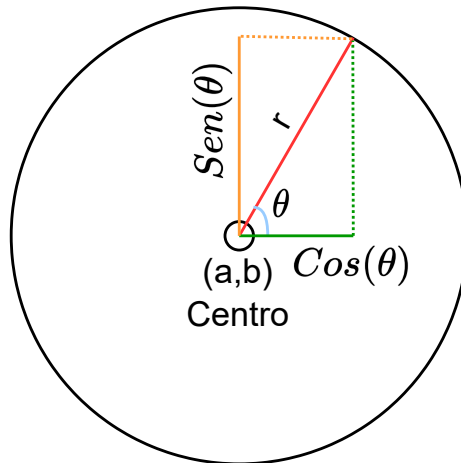


Figura 10.8: Concepto trigonométrico del círculo.

Con la respectiva ecuación para obtener las coordenadas.

$$\text{Coordenadas}(x) = a + \cos\left(\frac{2\pi}{1000}k\right) * r \quad (10.3)$$

$$\text{Coordenadas}(y) = b + \text{sen}\left(\frac{2\pi}{1000}k\right) * r \quad (10.4)$$

Donde, en ambos casos  $k = 0 \dots 1000$  y  $r$  es el radio promedio mostrado en los Cuadros [10.1](#), [10.2](#) y [10.3](#).

Por su parte, para el caso del centro, este se obtiene mediante un promedio del punto medio de los diámetros obtenidos para el diámetro de Feret (sólo de los utilizados en el promedio, es decir, se descartan tanto “d3” como “d7”) que se muestran en el Cuadro [10.1](#), en otras palabras: un punto medio tanto para la coordenada  $x$ , como para la coordenada  $y$  para cada uno de los diámetros, después se obtiene el promedio de dicho punto medio y así se posiciona el centro y, por ende, la circunferencia, en el centro de la Figura obtenida. Con esto en mente fue posible generar la pupila “reconstruida” con el algoritmo de morfología matemática dentro de una “pupila” obtenida a partir del diámetro de Feret. Para el caso 1, la diferencia entre los tres métodos, tomando como referencia el diámetro de Feret fue de 4.034 % respecto al método de conteo

de píxeles y de 3.185 % respecto al método de la estimación de la circunferencia; esto para la pupila derecha. Para la pupila izquierda las diferencias entre esos métodos fueron de 1.24 % y de 1.653 %, respectivamente para la pupila izquierda. Las áreas tuvieron una variación de 4.061 % (respecto al método de conteo de píxeles) y de 3.040 % (respecto al método de circunferencia), para la pupila izquierda. Y para la derecha, las diferencias respecto a los mismos métodos fueron 4.62 % y 4.978 %.

Pueden parecer diferencias nimias, no obstante, si se colocan las mismas diferencias dentro de la imagen original, se puede observar una consideración importante en la Figura [10.9](#).

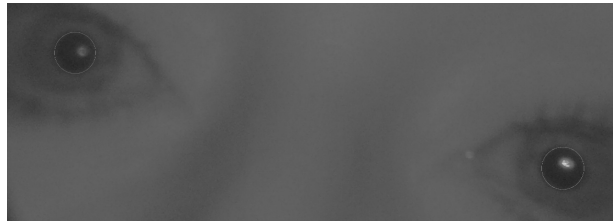


Figura 10.9: Superposición de las pupilas reconstruidas por Feret, en la imagen original del Caso 1.

Es posible apreciar que las pupilas han quedado muy bien identificadas tanto en tamaño como en posición, solventando las carencias que se podían observar de la recuperación por medio de los algoritmos de morfología matemática. De hecho, esta reconstrucción se puede observar en la Figura [10.10](#).

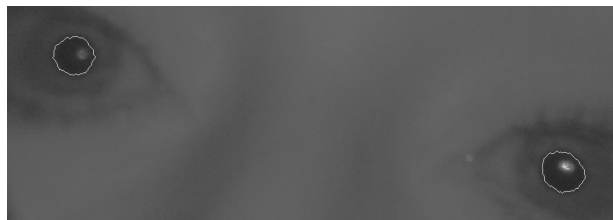


Figura 10.10: Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen original del Caso 1.

La reconstrucción de las pupilas por mera morfología matemática no fue posible del todo, si bien se rescató una buena parte de las mismas (como se ve en la Figura 10.10), se puede apreciar también que el algoritmo de Feret ayudó a mejorar dicha estimación y contribuyó a alcanzar una fidelidad mayor en las mediciones.

Otro aspecto que vale la pena estudiar es la observación de las pupilas rescatadas mediante morfología matemática, pero en este caso sobre la imagen pre-procesada, tal y como se muestra en la Figura 10.11.



Figura 10.11: Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen pre-procesada del Caso 1.

Al analizar dicha Figura, se puede observar que con el algoritmo es posible distinguir entre diferencias de contraste muy estrechas, sobre todo en el borde de la pupila, permitiendo discriminar fragmentos que no pertenecen a dicho elemento y que pueden ser derivados del brillo o de ruido.

Finalmente, se presentan las dos pupilas con un acercamiento para observar la estimación mediante diámetro de Feret, esto en la Figura 10.12.



(a) Estimación por Feret de la pupila derecha. (b) Estimación por Feret de la pupila izquierda.

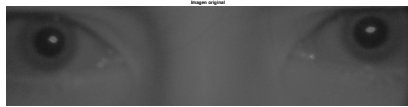
Figura 10.12: Diámetros de Feret marcados en el caso 1.

Como comentario final, es importante recordar que la designación de “de-recha” e “izquierda” fue hecha en función a la ubicación en el rostro del paciente de las pupilas y no de acuerdo a la ubicación de estas en la imagen.

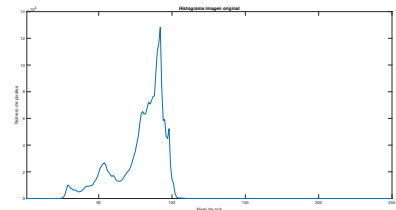
## 10.2. Caso 2: pupilas grandes

**Descripción del caso:** las pupilas que se presentan en este caso fueron capturadas a una distancia de 40 cm entre la cámara y el rostro, Las condiciones fueron: el paciente no presentaba ningún historial clínico relacionado con la oftalmología, tiene una edad de 27 años, es de género masculino. La iluminación de la habitación era la obtenida mediante luz natural en una habitación cerrada, en un horario de mediodía (sin luz del Sol incidiendo directamente).

Nuevamente y en primera instancia, se presenta la imagen original acompañada de su histograma, también se muestra la imagen pre-procesada junto a su propio histograma, todo en la Figura [10.13](#).



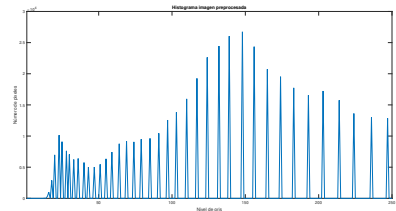
(a) Imagen del segundo caso.



(b) Histograma de la imagen original del segundo caso.



(c) Imagen pre-procesada del segundo caso.



(d) Histograma de la imagen pre-procesada del segundo caso.

Figura 10.13: Imágenes del segundo caso y del resultado del pre-procesamiento, acompañadas por sus histogramas.

El objetivo, como en el caso anterior y en los subsecuentes, es preservar el primer pico y algunos niveles posteriores, para poder tener un margen con el cual trabajar y que no se vea suprimido por efectos de la última apertura única. Con esto se vuelve a conservar parte del iris y la totalidad de las pupilas, mientras que el resto se vuelve blanco (el cual es el valor máximo, que es de 255).

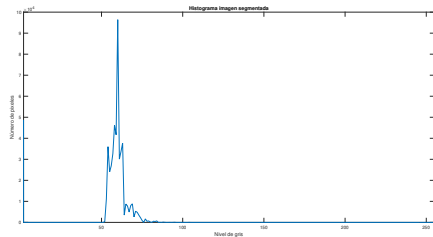
Se aplicó la última apertura única sobre la imagen de la Figura 10.13c, iniciando así el proceso de recuperación de las pupilas.

### 10.2.1. Recuperación de las pupilas

El resultado de la última apertura única es visible en la Figura 10.14a, y su histograma queda retratado en la Figura 10.14b.



(a) Resultado de la última apertura única en el segundo caso.



(b) Histograma de la imagen mostrada en la Figura 10.14a

Figura 10.14: Efectos de la última apertura única, en el segundo caso.

Si se observa la Figura 10.14a puede identificarse a las pupilas con facilidad a simple vista, siendo del color más oscuro, por lo que, al representar estas una zona considerable de la imagen, se vuelve a considerar que estas se encuentran en el primer pico y algunos niveles de gris subsecuentes, así, despejando de la Figura 10.14a, se pueden observar las pupilas en la Figura 10.15.

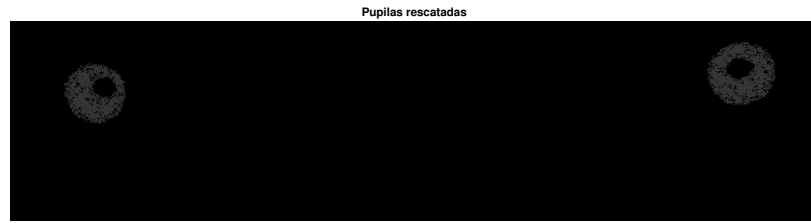




Figura 10.15: Segmentación de las pupilas del segundo caso.

Este caso, a diferencia del primero, sí que presenta remanentes que superaron el filtro del primer pico, los cuales son visibles arriba de cada una de las pupilas. Para desechar estos residuos se generó el marcador a partir de la ecuación 9.3, con el objetivo de marcar todos los objetos completos que pudieran tener forma geométrica.

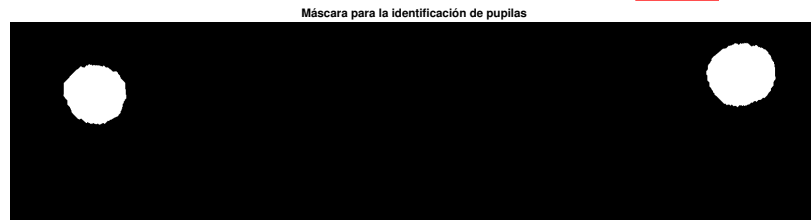
Una vez que se tiene el marcador, se procede a hacer una reconstrucción geodésica utilizando primero la apertura geodésica para desconectar elementos débilmente conectados, después, y sólo hasta después, se creó el marcador descrito en el párrafo anterior y este fue empleado en la erosión y dilatación geodésica para eliminar las estructuras intrusas remanentes. Todo ello con el mismo tamaño de disco que demostró el análisis granulométrico, que resultó ser el mismo que para el caso 1, es decir  $i = 3$ . La imagen limpia puede observarse en la Figura 10.16a.



(a) La base de las pupilas que se van a rescatar.



(b) Relleno de la base mostrada en la Figura 10.16a.



(c) Máscara creada para el caso 2.

Figura 10.16: Creación de la máscara para el rescate de pupilas, en el segundo caso.

De la Figura 10.16a, se puede decir que la base no ha perdido su forma en ninguna de las dos pupilas, ahora de dicha Figura a la Figura 10.16b, se rellenaron los huecos, con la misma técnica del caso 1, es decir, dilataciones sucesivas, seguidas de erosiones sucesivas a manera de filtros deslizantes.

En este estudio en particular, no se presentaron deformidades o destrucciones en las pupilas, por lo que simplemente se convirtió el resultado a una máscara binaria, visible en la Figura 10.16c.

El siguiente paso volvió a consistir en recuperar de la imagen original, lo que está delimitado por la máscara, con lo que se obtuvo el resultado de la Figura 10.17.

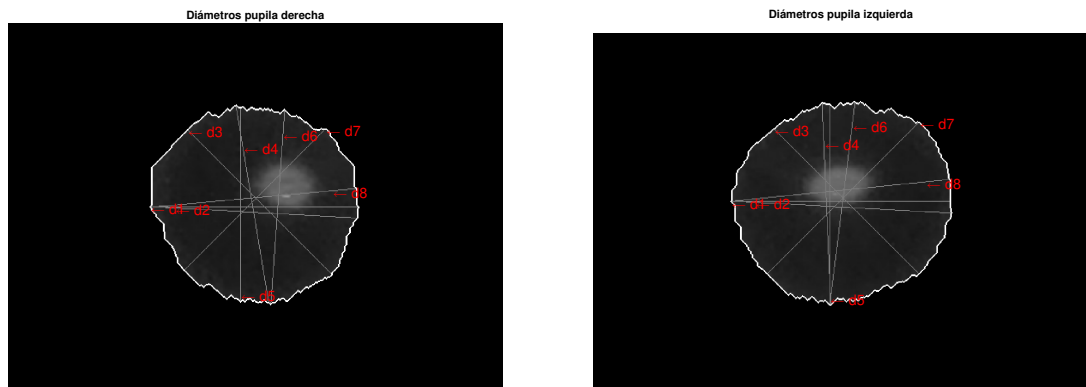


Figura 10.17: Resultado de la obtención de las pupilas en el caso 2.

Sobre tal Figura es posible realizar el procedimiento de medición de las pupilas.

### 10.2.2. Medición de las pupilas

Como primer punto se identificaron todos los diámetros de Feret, atendiendo a la Figura [9.12](#).



(a) Diámetros de Feret de la pupila derecha. (b) Diámetros de Feret de la pupila izquierda.

Figura 10.18: Diámetros de Feret marcados en el caso 2.

Como primera nota: las pupilas están etiquetadas de acuerdo a la posición de estas en el rostro del paciente (idéntico al caso 1) y no a su ubicación en la página.

Análogamente a lo acontecido con el caso 1, los diámetros no se empalmaron y tampoco se cruzaron por un punto común, en ninguna de las dos pupilas, por la naturaleza irregular de las estructuradas estudiadas, no obstante, es interesante ver que hay algunos diámetros como “d1” y “d2” (en ambos casos), que parten de un mismo punto, pero que sí varían en ángulo y en distancia, a pesar de que estos últimos tienen mayor libertad de recorrido, lo que lo hace más interesante puesto que las diagonales máximas no las encuentran rotando en demasía su ángulo.

Otro punto a comentar es que, a diferencia de las pupilas del caso 1, estas no tienden a ser circulares, sino que presentan una forma más parecida a la elíptica. También se pueden observar los estragos de los elementos estructurantes, sobre todo en la pupila derecha (en la parte noroeste de la misma), puesto que en los contornos se logran ver zonas rectas, propias de iterar en diversas ocasiones un operador de tamaño  $i = 3$  que, a pesar de ser un disco, por su tamaño tiende más a ser un rombo.

Ya que se identificaron los distintos diámetros, se procedió a registrar las medidas de todos en el Cuadro [10.4](#).

Cuadro 10.4: Medidas de los diámetros en el caso 2

| Pupila izquierda (Figura <a href="#">10.23b</a> ) |                  | Pupila derecha (Figura <a href="#">10.23a</a> ) |                  |
|---|------------------|---|------------------|
| Diámetro  | Medida (píxeles) | Diámetro  | Medida (píxeles) |
| d1  | 267              | d1  | 245              |
| d2  | 269              | d2  | 244              |
| d3*   | 177              | d3*   | 170              |
| d4  | 247              | d4  | 232              |
| d5  | 245              | d5  | 228              |
| d6  | 248              | d6  | 229              |
| d7*   | 185              | d7*   | 166              |
| d8  | 267              | d8  | 243              |
| diámetro promedio (Ferret)*                       | 258              | diámetro promedio (Ferret)*                     | 236              |
| radio promedio*                                   | 129              | radio promedio*                                 | 118              |

*\*NOTA: para los diámetros promedio no se tomaron en cuenta las diagonales de 45 grados (“d3” y “d7”), debido a su lejanía con respecto al resto de medidas, lo cual altera de sobremanera con la aproximación y los resultados.*

Es importante remarcar que los valores de los promedios, así como de los perímetros y las áreas están redondeados para cumplir con el píxel, que siempre se cuenta como unidad entera y no con decimales.

A raíz de la obtención de estos valores, se da con el área y el perímetro para el método del diámetro de Feret, mediante las ecuaciones 9.7 y 10.1.

Para el método de conteo de píxeles el área se tiene simplemente de la ecuación 9.6, mientras que al diámetro se llega mediante la ecuación 10.2 y al perímetro con una fórmula análoga a la vista en la ecuación 10.1.

Por su parte, para la circunferencia promedio se utilizan las ecuaciones 9.9, 9.10, para el radio y el área, respectivamente, a partir de ahí se llega al diámetro mediante una multiplicación del radio por 2.

Los resultados de este caso son mostrados en los Cuadros 10.5 y 10.6.

Cuadro 10.5: Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 2 (pupila izquierda)

| -              | Método            |                   |                         |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
|                | Diámetro de Feret | Conteo de píxeles | Circunferencia promedio |
| Radio          | 129px             | 126px             | 128px                   |
| Diámetro       | 258px             | 252px             | 256px                   |
| Área           | 52369px           | 50188px           | 51472px                 |
| Circunferencia | 811px             | 792px             | 804px                   |

Cuadro 10.6: Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 2 (pupila derecha)

| -              | Método            |                   |                         |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
|                | Diámetro de Feret | Conteo de píxeles | Circunferencia promedio |
| Radio*         | 118px             | 117px             | 118px                   |
| Diámetro       | 239px             | 234px             | 236px                   |
| Área           | 44283px           | 42809px           | 43744px                 |
| Circunferencia | 748px             | 735px             | 741px                   |

Si se realiza una comparativa de las mediciones se tienen las siguientes observaciones: comenzando con la pupila izquierda, considerando al diámetro de Feret como el método de referencia, entonces se ve que el radio presenta una ligera disminución del 2.3256 % cuando se utiliza el método de conteo de píxeles y un decremento en píxeles del 0.7752 % al usar el método de la circunferencia promedio; el diámetro, en tanto se ve disminuido en los mismos porcentajes al compararse con los mismos métodos; el área presenta una reducción del 4.1647 % cuando se cuentan los píxeles que se rescatan, y una disminución del 1.7129 %; finalmente, en lo referente al perímetro (o circunferencia), la reducción es del 2.3428 % y 0.8631 %, para los dos métodos mencionados, respectivamente.

Sobre las mismas comparativas entre métodos para la pupila derecha, se tiene: el radio se ve disminuido en un píxel (0.8475 %) al compararse con el método por conteo de píxeles y no presenta cambios por el método de circunferencia promedio; el diámetro cae en 2.0921 % cuando se opta por el método de conteo de píxeles, y pasa esto en un 1.2552 % cuando se elige el método de circunferencia promedio; el área es el parámetro en donde se presenta una variación más destacable: baja en un 3.3286 % cuando se utiliza el conteo de píxeles, y un 1.2172 % al emplear la circunferencia promedio; en última instancia: el perímetro disminuye 1.738 % usando el conteo de píxeles y un 0.9358 % en circunferencia promedio.

Es de gran utilidad destacar que al ser pupilas completas se ven diferencias aceptables para un margen de tolerancia de un 5 %, en cuanto a diferencia de valores se refiere. También es importante señalar que, en ocasiones, el radio no coincide con el diámetro por cuestiones de redondeo en los algoritmos y cálculos, al emplear la medida de píxel (valor cerrado).

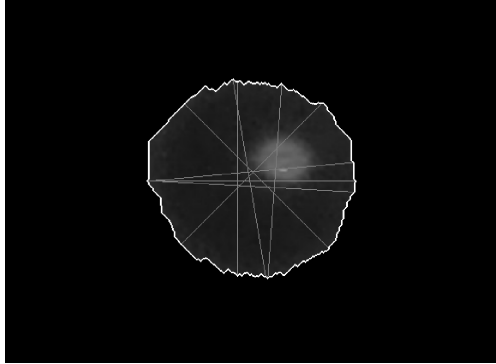
También se presenta otra tendencia: el diámetro de Feret se acerca más a las medidas obtenidas mediante la circunferencia promedio que al conteo por píxeles, esto no quiere decir que ambos métodos den medidas más exactas, debido a que están nutridas por estimaciones dependientes de figuras circulares, sin embargo y en este caso, se puede apreciar que las pupilas (al menos por la recuperación mediante operadores morfológicos), tienden a mostrarse más elípticas que circulares.

En la Figura [10.19](#) se pueden apreciar las medidas ejemplificadas, acompañadas por su morfología.

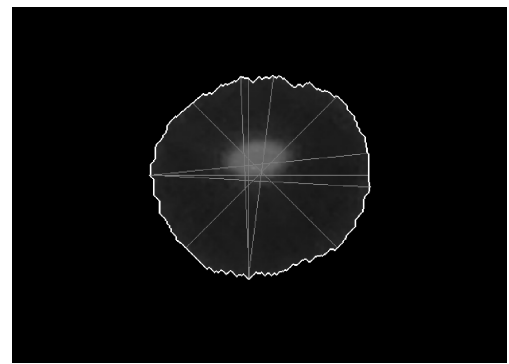
Si se presta atención a las Figuras [10.19d](#) y [10.19c](#), se puede distinguir que tanto la estimación por medio de Feret como la conseguida mediante los algoritmos de morfología matemática tienden a ser muy similares en cuanto a dimensiones y a posicionamiento se refiere, esto puede parecer obvio, pero es de especial interés en casos en donde la pupila no se encuentra completa o presenta deformidades (véase casos 3 y 4).

Es con los resultados visibles en la Figura [10.19](#) al completo que se puede ver que la estimación mediante el diámetro de Feret sí tiende a identificar una superficie mayor que en el caso del conteo por píxeles (que viene a ser lo recuperado por los operadores morfológicos), lo cual indica que sí muestra tendencia a absorber posibles defectos en el procesamiento o ruido.

Área por Feret = 44283, Área por conteo = 42809, Área por promedio de circunferencias = 43744

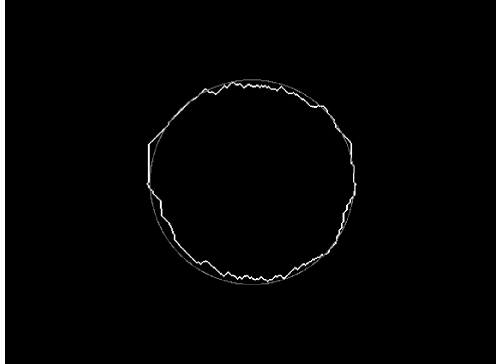


Área por Feret = 52369, Área por conteo = 50188, Área por promedio de circunferencias = 51472

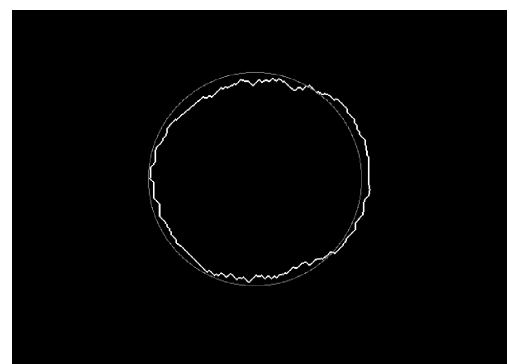


(a) Medidas de la pupila derecha en el caso 2, (b) Medidas de la pupila izquierda en el caso 2, perímetro.

Perímetro por Feret = 748, Perímetro por conteo = 735, Perímetro de circunferencias = 741



Perímetro por Feret = 811, Perímetro por conteo = 792, Perímetro de circunferencias = 804



(c) Medidas de la pupila derecha en el caso 2, (d) Medidas de la pupila izquierda en el caso 2, perímetro.

Figura 10.19: Medidas de ambas pupilas en el Caso 2.

Una vez concluido el análisis de las medidas, se da paso a ver qué es lo que sucede cuando se empalma la estimación por medio del diámetro de Feret en la imagen original, resultado presentado en la Figura [10.20](#).



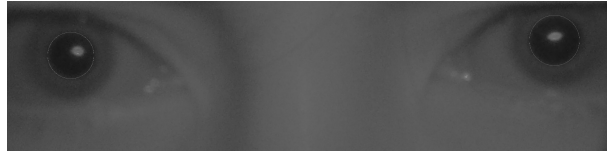


Figura 10.20: Superposición de las pupilas reconstruidas por Feret, en la imagen original del Caso 2.

Si se presta atención a la Figura 10.20, es posible apreciar que el tamaño es el correcto y sí engloba a las pupilas completas, en términos visuales y en la escala manejada (algo en lo que se hace énfasis en la Figura 10.23). Otro punto favorable es que el posicionamiento por medio del promedio del punto medio de las diagonales sí coloca a las pupilas en el lugar correcto, por lo que puede considerarse como otro punto sólido que respalda la estimación realizada mediante operadores morfológicos y diámetro de Feret.

Respecto a los resultados de los operadores morfológicos, si estos se sobreponen en la imagen original, se llega a la Figura 10.21.

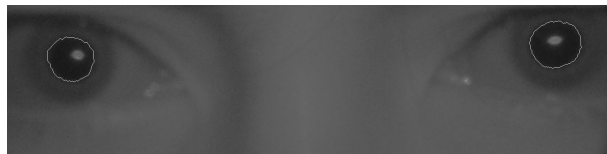


Figura 10.21: Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen original del Caso 2.

En este caso se ve en la Figura 10.21 que las pupilas fueron recuperadas casi en su totalidad (hecho compensado con el diámetro de Feret), dejando apenas fuera partes de la pupila que ya se entremezclan con las sombras, el iris y el ruido; no obstante, la ventaja respecto al ojo de un especialista es mucho mayor, en términos de precisión.

Otro ejemplo es montar las pupilas marcadas por el diámetro de Feret y las pupilas recuperadas por medio de los operadores morfológicos en la imagen

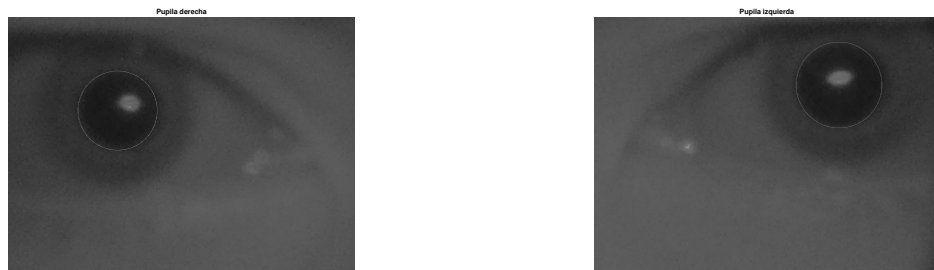
pre-procesada, a manera ilustrativa, todo ello en la Figura [10.22](#).



Figura 10.22: Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen pre-procesada del Caso 2.

En la Figura [10.21](#) se hace más evidente el ruido implícito que afecta a las pupilas, pues deja ver la superficie no contemplada por los operadores morfológicos, sin embargo, es importante tener en cuenta que dichas regiones ignoradas no necesariamente son parte de las pupilas y pueden tratarse de sombras y bordes del iris que tienden a ser más oscuros, sin alcanzar los niveles de gris de aquellas.

Como última ilustración del caso se muestra la estimación realizada por medio de Feret en ambas pupilas, con un acercamiento, esto en la Figura [10.23](#).



(a) Estimación por Feret de la pupila derecha. (b) Estimación por Feret de la pupila izquierda.

Figura 10.23: Diámetros de Feret marcados en el caso 2.

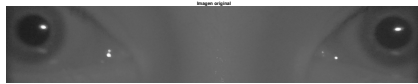
De la Figura [10.23](#) se hace evidente que hace falta un ligero ajuste al centro de las pupilas para que terminen por encajar en el centro real de la imagen, esto hace que se abarquen las zonas que, a simple vista, no están contempladas,

pero que sí están incluidas en la estimación de Feret, sin importar el posicionamiento, lo que hace a las medidas más dependientes de la forma rescatada que de la ubicación de la representación en sí.

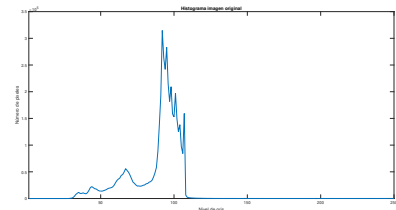
### 10.3. Caso 3: pupila destruida por reflejo de luz infrarroja

**Descripción del caso:** este caso es con el mismo sujeto de prueba del caso 2, con la diferencia de que la iluminación fue derivada de luz natural, en un horario nocturno. Las imágenes se capturaron a una distancia de 15 cm. Además, las pupilas se encontraban dilatadas. Se presenta este caso en particular debido a que se pretende mostrar la eficiencia de los algoritmos al momento de recuperar y medir las pupilas.

El primer paso de este segundo caso consiste en mostrar en la Figura 10.24 la imagen a analizar en cuestión, acompañada de su histograma, así como el resultado del pre-procesamiento, junto a su propio histograma.



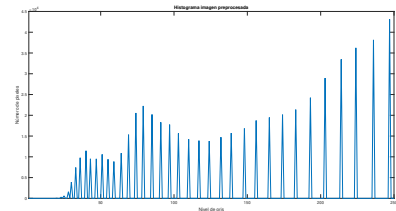
(a) Imagen del tercer caso.



(b) Histograma de la imagen original del tercer caso.



(c) Imagen pre-procesada del tercer caso.



(d) Histograma de la imagen pre-procesada del tercer caso.

Figura 10.24: Imágenes del tercer caso y del resultado del pre-procesamiento, acompañadas por sus histogramas.

De la Figura 10.24 se puede percibir que la parte pre-procesada abarca los dos primeros picos y los dos primeros valles, el tercer pico ya no lo cubre, no obstante, es posible observar la tendencia que llevaba.

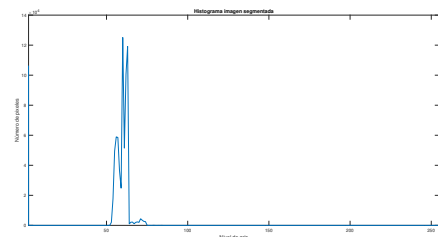
De la Figura 10.24c en concreto, se pueden observar algunas sombras a los costados de las pupilas las cuales pueden llegar a sobreponerse a la segmentación por última apertura única. Además, se observa la particularidad de que la pupila derecha del paciente se ve destruida por el brillo de la luz infrarroja que golpea justo en el borde de la pupila. Con esto en mente se procede con el procedimiento de recuperación de las pupilas.

### 10.3.1. Recuperación de las pupilas

Siguiendo la metodología propuesta en el algoritmo, corresponde el turno de mostrar la segmentación que logra realizar la última apertura única a la imagen de la Figura 10.24c; el resultado de dicho operador se puede observar en la Figura 10.25.



(a) Resultado de la última apertura única en el tercer caso.



(b) Histograma de la imagen mostrada en la Figura 10.25a

Figura 10.25: Efectos de la última apertura única, en el tercer caso.

Por la Figura 10.25b se puede observar un alto número de píxeles en el resultado, en concreto, los picos suelen ser muy pronunciados (destacándose los tres primeros), y lo mismo ocurre con los valles; esto hace que, aunado a lo que se observa en 10.25a, se necesite un especial cuidado con la elección de valores de niveles de gris a segmentar, debido a que las pupilas vienen entremezcladas con el iris e incluso con las sombras que se ven en los bordes

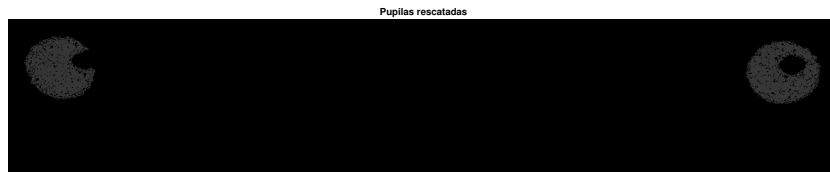
(aspecto comentado en el apartado anterior), no obstante, si se procede con la misma elección que en los dos casos anteriores (primer pico, los niveles anteriores a él y un par de niveles posteriores).

Al rescatar dicho espectro de la imagen, el resultado que se tiene son las pupilas segmentadas, como se aprecia en la Figura [10.3](#).

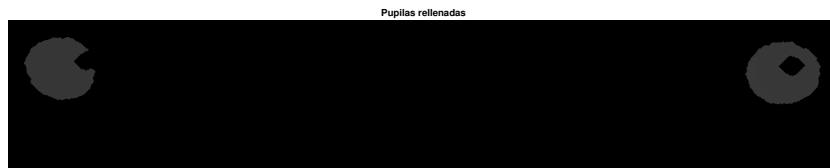


Figura 10.26: Segmentación de las pupilas del tercer caso.

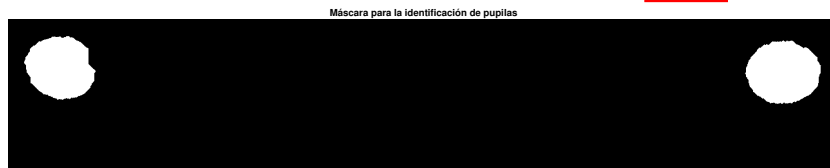
Si se observa la Figura [10.26](#), se logra percibir de mejor manera el efecto destructivo que tuvo el haz de luz infrarroja en el borde la pupila, además también se distingue el ruido de las sombras a los costados de la imagen, además de un poco de ruido que se coló alrededor de las pupilas, no obstante, aplicando el procedimiento de reconstrucción geodésica se logra limpiar la imagen, manteniendo las pupilas y dando paso a la cuestión interesante de este caso: la reconstrucción de la pupila destruida, todo ello visto en la Figura [10.27](#).



(a) La base de las pupilas que se van a rescatar.



(b) Relleno de las base mostrada en la Figura 10.27a.



(c) Máscara creada para el caso 3.

Figura 10.27: Creación de la máscara para el rescate de pupilas, en el tercer caso.

El cambio visible entre la Figura 10.26 y la Figura 10.27a es principalmente el rescate de únicamente las pupilas mediante la reconstrucción geodésica que utiliza el algoritmo resumido en la definición 9.3; destacando principalmente que los costados ya no presentan las sombras.

De una manera análoga a los dos casos anteriores, la diferencia entre las Figuras 10.27a y 10.27b, mediante los filtros deslizantes de dilatación y erosión se cubrieron todos los poros pequeños (ceros) que había en la estructura interna de cada pupila, no obstante, en este caso se puede detectar que la pupila derecha (ubicada a la izquierda en las imágenes presentadas en este caso), está destruida, además que el orificio de la pupila izquierda (ubicada a la derecha), tampoco se terminó de cubrir, ante esto, se da el procesamiento entre las Figuras 10.27b y 10.27c se convirtió la imagen a escala binaria y se aplicó una técnica de relleno que no involucra operadores morfológicos: consiste en

llenar de unos (o valores de 255) todos los píxeles que se encuentran con valor cero, por debajo de la cuenca, tal y como se ejemplifica en la Figura [10.28](#).

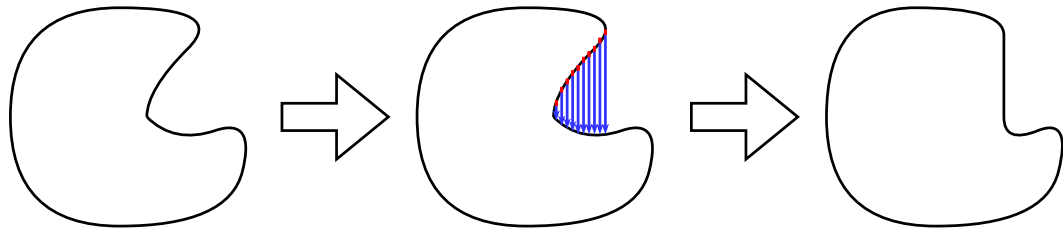


Figura 10.28: Algoritmo de relleno especial.

En donde se distingue que se recorre todo el perímetro de la figura y en donde se encuentren zonas vacías hacia el sur, se rellene con unos, pero sólo dentro de la Figura, por supuesto que esto no rescata todo, pero sí salva una mayor superficie, sin destruir la forma del elemento a estudiar, esto se hizo debido a que al iterar un exceso de veces los filtros deslizantes de erosión y dilatación, puede ser contraproducente (sobre todo si se alcanzan los bordes de la imagen), lo que puede destruir la propia forma estudiada.

Con esto se procedieron a rescatar las pupilas de la imagen original, resultado visto en la Figura [10.29](#).



Figura 10.29: Resultado de la obtención de las pupilas en el caso 3.

A simple vista se observa que en el caso de la pupila izquierda del paciente, esta se recuperó en su forma íntegra, en cuanto a forma se refiere; no obstante, la pupila derecha (ubicada a la izquierda de la Figura [10.29](#)), se observa destruida en buena parte, del lado del reflejo, que sí termina por recortar superficie que pertenece al elemento a estudiar. Sin embargo, uno de los objetivos de este trabajo es el de presentar un algoritmo que sea capaz de absorber

estas irregularidades, en lo que a medición se refiere, por lo cual se da paso a la medición de las pupilas en este caso.

### 10.3.2. Medición de las pupilas

El primer paso consistió en marcar los distintos diámetros de Feret obtenidos en este caso, los cuales se presentan en la Figura 10.30.



(a) Diámetros de Feret de la pupila derecha. (b) Diámetros de Feret de la pupila izquierda.

Figura 10.30: Diámetros de Feret marcados en el caso 3.

Las pupilas presentadas en la Figura 10.30 están rotuladas siguiendo la misma nomenclatura de los dos casos anteriores (que, a su vez, se basan en lo visto en la Figura 9.12). En este caso, las pupilas tienden a verse como elipses, sin embargo, distan de tener un contorno perfecto, como lo visto en los dos casos anteriores, dicho sea de paso, este aspecto podría mejorar con una cámara de mejor resolución con zoom óptico.

Otro aspecto a destacar en la Figura 10.35a es que ningún diámetro está dentro de la línea recta formada por el algoritmo de relleno especial, lo cual indica que no se consideró como tal para la construcción y medición de la pupila, pudiendo considerarse esto como un aspecto incierto dado que puede ser que en tal superficie perdida pudiera encontrarse, o no, un diámetro mayor a los encontrados.

Las dimensiones en píxeles de todos los diámetros de cada pupila se pueden ver en el Cuadro 10.7.



Cuadro 10.7: Medidas de los diámetros en el caso 3

| Pupila izquierda (Figura 10.35b) |                  | Pupila derecha (Figura 10.35a) |                  |
|----------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| Diámetro                         | Medida (píxeles) | Diámetro                       | Medida (píxeles) |
| d1                               | 470              | d1                             | 428              |
| d2                               | 464              | d2                             | 445              |
| d3*                              | 298              | d3*                            | 303              |
| d4                               | 389              | d4                             | 392              |
| d5                               | 388              | d5                             | 388              |
| d6                               | 393              | d6                             | 396              |
| d7*                              | 301              | d7*                            | 281              |
| d8                               | 472              | d8                             | 419              |
| diámetro promedio (Feret)*       | 429              | diámetro promedio (Feret)*     | 412              |
| radio promedio*                  | 215              | radio promedio*                | 206              |

*NOTA: para el diámetro y el radio promedio no se emplean las diagonales de 45 grados (“d3” y “d7”), al alejarse bastante del promedio del resto de diagonales, con lo que los resultados de la aproximación se verían afectados.*

Al igual que en los dos casos anteriores, se emplean las ecuaciones 9.6, 9.7, 9.8, 9.9, 9.10, 10.1 y 10.2 para obtener los radios, diámetros, perímetros y áreas correspondientes a los tres distintos métodos: por diámetro de Feret, por Conteo de Píxeles y por Circunferencia, todos ellos presentados en píxeles.

Tales datos son presentados en los Cuadros 10.8 y 10.9.

Cuadro 10.8: Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 3 (pupila izquierda)

| -              | Método            |                   |                         |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
|                | Diámetro de Feret | Conteo de píxeles | Circunferencia promedio |
| Radio          | 216px             | 211px             | 215px                   |
| Diámetro       | 432px             | 422px             | 429px                   |
| Área           | 146197px          | 140137px          | 145220px                |
| Circunferencia | 1357px            | 1326px            | 1349px                  |

Cuadro 10.9: Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 3 (pupila derecha)

| -              | Método            |                   |                         |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
|                | Diámetro de Feret | Conteo de píxeles | Circunferencia promedio |
| Radio*         | 206px             | 203px             | 210px                   |
| Diámetro       | 412px             | 406px             | 419px                   |
| Área           | 133455px          | 129300px          | 138544px                |
| Circunferencia | 1294px            | 1275px            | 1318px                  |

Si se empiezan a comparar las medidas: para la pupila izquierda, en términos de diámetros, tomando como referencia a lo obtenido por medio del diámetro de Feret, se ve una disminución de 2.3148 % en el caso del método por conteo de píxeles y una disminución de 0.6944 % en el método de Circunferencia; ahora, respecto a las áreas: hay una disminución de 4.1451 % de superficie con el método de conteo de píxeles y una disminución de 0.6683 % respecto al método del promedio de la circunferencia (o el contorno; finalmente, en lo que concierne a la circunferencia (o perímetro), hay un descenso de un 2.2845 % al usar el método del conteo de píxeles y un descenso del 0.5895 % al emplear el método del promedio de la circunferencia. Tomando en cuenta que esta fue la pupila completa, es de esperarse que las mediciones sean muy similares entre sí, dado que preservan una forma constante en las tres mediciones; no obstante, es importante resaltar que las formas obtenidas en estas pupilas (al igual que en el caso 2) fueron elipses, y se comparan con un círculo formado a partir de estimaciones.

El aspecto interesante resulta en la pupila derecha (recortada por el reflejo de luz): tomando como punto de referencia a las medidas del diámetro de Feret: el diámetro presenta un descenso del 1.4423 % al utilizar el método del conteo de píxeles, en contraparte, hay un incremento del 1.699 % si se opta por el método de la circunferencia promedio; en lo que engloba al área, el descenso es de un 3.1134 % en el método por conteo de píxeles y un au-

mento de 3.8133 % en el método de la circunferencia promedio; por último, en materia de perímetros, este disminuye en un 1.4683 % al pasar al método por conteo de píxeles, y e incrementa un 1.8547 % al pasarse al método de la circunferencia promedio. Para este caso se tiene que el método del diámetro de Feret se encuentra en un punto intermedio entre los tres métodos, no obstante podría considerarse más fiel a la medida buscada, debido a que se basa en estimaciones (que incluso se podrían tildar de predicciones) y no en medidas dependientes de la morfología de la pupila como ocurre en los otros dos casos. Sin embargo, si se apela a la Figura 10.31c, en la reconstrucción del círculo, se ve que la estimación engloba perfectamente la parte destruida por el reflejo. Así pues, las mediciones de estas pupilas quedan ilustradas en la Figura 10.31.

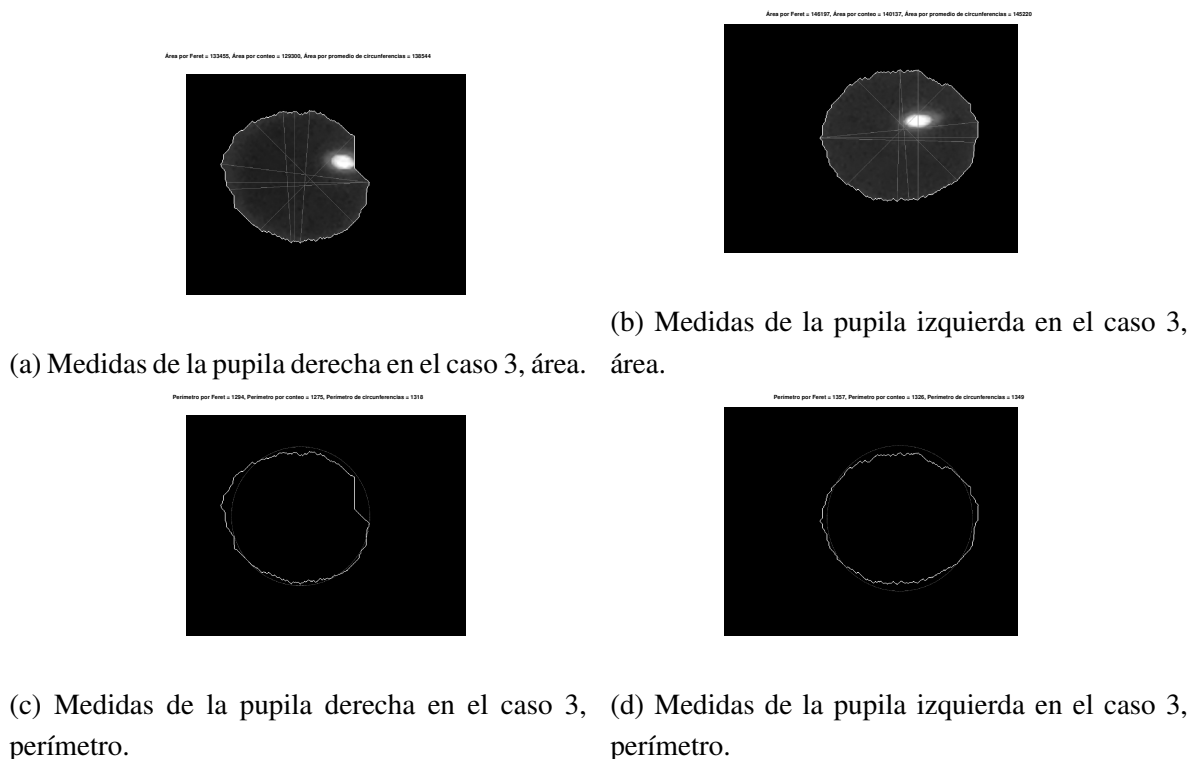


Figura 10.31: Medidas de ambas pupilas en el Caso 3.

De dicha Figura es posible observar que se tiene una forma que tiende a ser elíptica en las pupilas (incluso en la destruida, mostrada en la Figuras

[10.31a] y [10.31c]), algo comprobable si se analiza la estimación superpuesta de la pupila por medio del diámetro de Feret en la Figura [10.31d]. Siguiendo con el análisis de esta morfología, se observa que el círculo generado a partir de las estimaciones de Feret sí logra absorber la fracción de la pupila que ha sido destruida. Situación que resulta más clara si se incluyen las pupilas estimadas por medio del diámetro de Feret en la Figura [10.24a], tal y como queda retratado en la Figura [10.32].

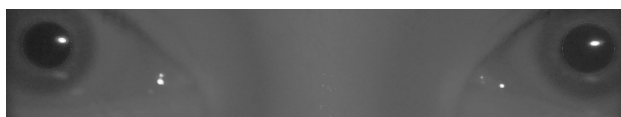


Figura 10.32: Superposición de las pupilas reconstruidas por Feret, en la imagen original del Caso 3.

En dicha Figura se puede apreciar que las estimaciones encajan en cuanto a posición y a tamaño con las pupilas, tanto la izquierda como la derecha (tomando en cuenta la perspectiva del paciente y no la de la imagen), incluso cómo en esta última el círculo consigue encerrar el reflejo de luz. Si se repite el mismo ejercicio con las pupilas obtenidas mediante el algoritmo de morfología matemática se obtiene lo presentado en la Figura [10.33].

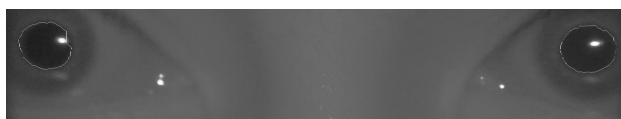


Figura 10.33: Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen original del Caso 3.

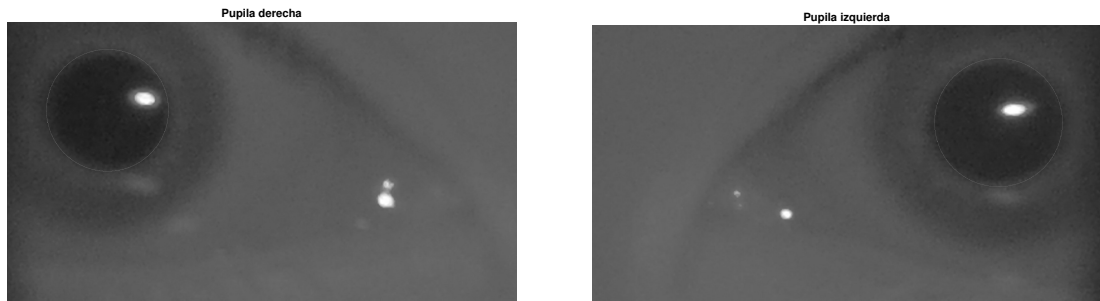
De dicha Figura se puede apreciar que el reflejo de luz infrarroja en el borde de la pupila si destruye una parte significativa tanto para alterar el área medida como el posible diámetro máximo que se pudiese obtener mediante el algoritmo de Feret. Esto puede no ser tan apreciable hasta que se observa a las

estimaciones sobre la imagen pre-procesada, tal y como sucede en la Figura [10.34](#).



Figura 10.34: Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen pre-procesada del Caso 3.

Tomando en consideración lo dicho, se observa que todo lo que se encuentra afectado por el reflejo de luz, pues este tiende a hacerse más grande y los bordes también tienden al blanco, por lo que se podría pensar en una solución como aumentar la cantidad de picos que se van a procesar, no obstante, esto podría ocasionar que la recuperación de pupilas sea más compleja al tener que desprenderlas de elementos conexos no presentes en niveles bajos como los utilizados en el presente trabajo.



(a) Estimación por Feret de la pupila derecha. (b) Estimación por Feret de la pupila izquierda.

Figura 10.35: Diámetros de Feret marcados en el caso 3.

En la Figura [10.35](#), se muestra un acercamiento para poder apreciar de me-

jor forma la estimación en las imágenes originales, dejando más expuesto el resultado obtenido para este caso, mostrado por el atractivo de ver si el algoritmo podría o no absorber irregularidades como defectos en la iluminación.

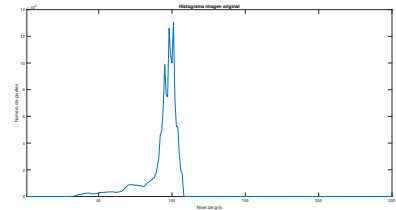
#### 10.4. Caso 4: pupila destruida por un defecto cutáneo

**Descripción del caso:** el participante de este caso fue un varón de 24 años, quien cuenta con una malformación en su párpado izquierdo, la cual ocasiona que su pupila no pueda ser obtenida por completo. Las condiciones de la imagen fueron: 50 cm de distancia entre la cámara y el participante, en condiciones de luz natural a mediodía (sin luz directa del sol incidiendo en la habitación).

La imagen de este particular caso se presenta en la Figura 10.36a, en concreto, el defecto visual se puede apreciar en el ojo izquierdo del paciente, en la parte superior.



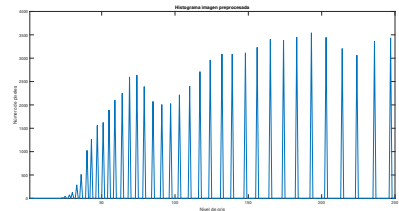
(a) Imagen del cuarto caso.



(b) Histograma de la imagen original del cuarto caso.



(c) Imagen pre-procesada del cuarto caso.



(d) Histograma de la imagen pre-procesada del cuarto caso.

Figura 10.36: Imágenes del cuarto caso y del resultado del pre-procesamiento, acompañadas por sus histogramas.

Retomando el tema de la deformidad, esta se puede apreciar con más claridad en la Figura 10.36c, de hecho, es un caso con mucho potencial, debido a que este fragmento de piel casi choca con el reflejo de luz infrarroja, por lo que se tiene un doble desafío, adicional a esto, las sombras se encuentran muy cerca de las pupilas, con lo que puede darse el caso de que estas sobrevivan a los filtros de la misma forma en que lo harán las pupilas.

Como puntualización adicional, si se observan los dos histogramas en las Figuras 10.36b y 10.36d, se puede distinguir que se rescató el primer pico e incluso el primer valle y buena parte del segundo pico, esto bajo las mismas condiciones de operaciones que los tres casos anteriores.

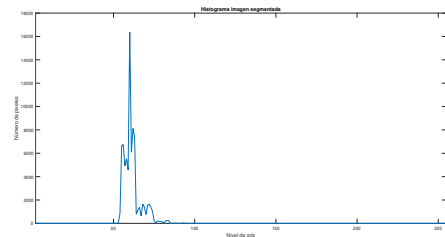
Sobre esta base es que se puede aplicar el operador de la última apertura única, y el proceso de recuperación de pupilas en general.

#### 10.4.1. Recuperación de las pupilas

El siguiente paso en el algoritmo es aplicar la última apertura única a la imagen pre-procesada (Figura 10.36c), para sólo salvar la parte intermedia del espectro del histograma de dicha imagen. El resultado es visible, acompañado por su histograma, en la Figura 10.37.



(a) Resultado de la última apertura única en el cuarto caso.



(b) Histograma de la imagen mostrada en la Figura 10.37a

Figura 10.37: Efectos de la última apertura única, en el cuarto caso.

A pesar de que se preservó una mayor cantidad de espectro de la imagen original al pre-procesarla, en la Figura 10.37a se ve que apenas se pudieron salvar las pupilas, junto con las sombras que las acompañan, sin embargo, no

se recuperó nada del iris, con lo que se puede descartar esta parte. Ahora, si se considera el primer pico y primer valle del histograma de la Figura 10.37b, para segmentar las pupilas (algo estandarizado en el pupilómetro), entonces el resultado al que llega es el mismo de la Figura 10.38.

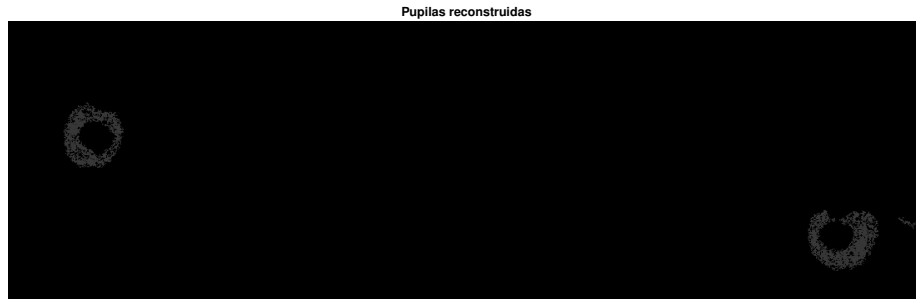
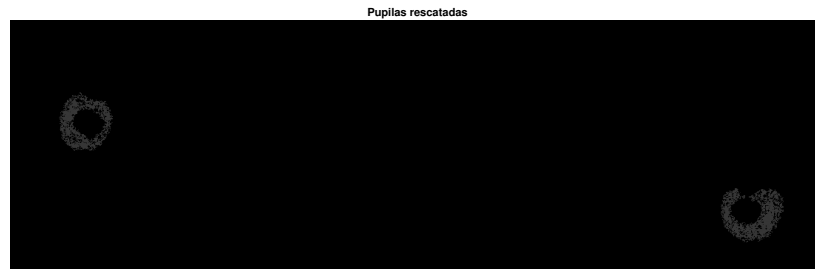


Figura 10.38: Segmentación de las pupilas del cuarto caso.

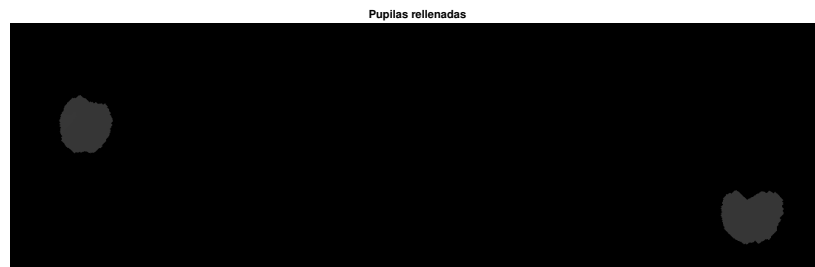
A pesar de que en la Figura 10.37a se puede ver que la pupila izquierda quedó completamente registrada, al realizar la segmentación de niveles de grises comentada, se ve que el trozo de piel se ha ido, con lo que la pupila ha quedado incompleta, incluso en contorno, situación similar al caso 3, sólo que en este caso el corte no es total y es posible solventarlo, en buena medida con el algoritmo tal y como se ha planteado. Otro detalle es que, además de las pupilas, también quedó cierto remanente de las sombras junto a las pupilas, con lo que es necesario emplear transformaciones geodésicas para removerlo.

Aplicando la apertura geodésica y el método visto en la ecuación 9.3 se llega a la base mostrada en la Figura 10.39a. El tamaño del elemento estructurante utilizado fue de  $i = 3$  (como en el resto de los casos).





(a) La base de las pupilas que se van a rescatar.



(b) Relleno de las base mostrada en la Figura 10.39a.



(c) Máscara creada para el caso 4.

Figura 10.39: Creación de la máscara para el rescate de pupilas, en el cuarto caso.

Siguiendo con el análisis de la Figura 10.39, se rellenan los huecos de la Figura 10.39a mediante los filtros consecutivos de dilatación y erosión (para no alterar el tamaño de las pupilas): en este caso, (Figura 10.39b) se observa que también se rellenaron los huecos producidos por el reflejo de luz en cada pupila.

El siguiente paso consistió en convertir a escala binaria y rellenar algunos potenciales huecos, con lo que se tiene la máscara de la Figura 10.39c.

Así, si se interpola la máscara y la imagen original, el resultado es el presentado en la Figura [10.40](#).



Figura 10.40: Resultado de la obtención de las pupilas en el caso 4.

Si bien es cierto que se puede aumentar la superficie detectada, en un algoritmo similar al visto en el caso 3, se decidió poner a prueba el algoritmo de estimación por medio de Feret con estos resultados, para determinar hasta qué punto se pueden solventar los defectos de este tipo en el proceso de medición, es por eso que en la Figura [10.40](#) se mantiene la pupila izquierda del paciente incompleta.

Tras tener este rescate, de pupilas es posible dar paso al proceso de medición de estas.

#### **10.4.2. Medición de las pupilas**

Antes de dar paso a la medición directa de pupilas, se procede a la colocación de los distintos diámetros de Feret, en cada una de las pupilas, con base en la Figura [9.12](#).



(a) Diámetros de Feret de la pupila derecha. (b) Diámetros de Feret de la pupila izquierda.

Figura 10.41: Diámetros de Feret marcados en el caso 4.

De la Figura [10.41](#), en la pupila derecha se ve que son tres los diámetros que se incrustan en el pico ubicado en la parte noroeste de la pupila: “d4”, “d5” y “d6”, esto da luz sobre el funcionamiento del algoritmo de detección de diámetros máximos en cada orientación.

El caso más llamativo es el de la pupila izquierda, el cual ve cómo 4 de los 8 diámetros se posicionan de forma horizontal, que es donde la pupila se encuentra más completa, es incluso interesante que los únicos diámetros fijos que quedan fuera son el “d3”, “d5” y “d7”, siendo que el “d5”, a pesar de todo toma la posición más alta en la vertical, ante la forma irregular de la pupila. En tanto, la única diagonal que varía su ángulo que no se encuentra en el plano horizontal fue la “d6”. Respecto a “d3” y “d7”, contrario a lo que pudiera parecer, no son las más extensas, véase el Cuadro [10.10](#). ¿Qué indicativo se obtiene de esta observación? Que las diagonales siempre buscarán posicionarse en donde más completa se encuentre la pupila.

En el Cuadro [10.10](#) se exponen las medidas de las diagonales así como los promedios del diámetro y del radio, cabe destacar que estos se muestran en datos redondeados para coincidir con la naturaleza del píxel: descrito en valores enteros.

Cuadro 10.10: Medidas de los diámetros en el caso 4

| Pupila izquierda (Figura 10.46b) |                  | Pupila derecha (Figura 10.46a) |                  |
|----------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| Diámetro                         | Medida (píxeles) | Diámetro                       | Medida (píxeles) |
| d1                               | 170              | d1                             | 146              |
| d2                               | 170              | d2                             | 145              |
| d3*                              | 119              | d3*                            | 104              |
| d4                               | 146              | d4                             | 157              |
| d5                               | 137              | d5                             | 155              |
| d6                               | 143              | d6                             | 157              |
| d7*                              | 120              | d7*                            | 111              |
| d8                               | 170              | d8                             | 145              |
| diámetro promedio (Feret)*       | 156              | diámetro promedio (Feret)*     | 151              |
| radio promedio*                  | 78               | radio promedio*                | 75               |

*\*NOTA: en los diámetros promedio de este caso tampoco se tomaron en cuenta las diagonales de 45 grados (“d3” y “d7”), pues se alejan en buena medida con respecto a la mayoría, esto hace que las estimaciones disminuyan, con lo que la superficie rescatada distaría mucho (tanto visual como analíticamente) de lo que en realidad debería obtenerse.*

Se vuelven a emplear las mismas ecuaciones que en los tres casos anteriores, para los tres métodos de medición.

Ya que se obtuvieron tanto el diámetro promedio como el radio promedio de Feret, se da con el área y el perímetro haciendo uso de las ecuaciones 9.7 y 10.1, respectivamente.

En el segundo método (por conteo de píxeles), ya se dispone del área al hacer uso de la ecuación 9.6, por su parte, el diámetro se consigue a partir de ejecutar la ecuación 10.2, importante remarcar que se usa una analogía de la ecuación 10.1 para dar con el perímetro, sustituyendo el área en donde se emplea el diámetro obtenido con la ecuación anteriormente mencionada.

El último método, de la circunferencia promedio, echa mano de la ecuación 9.9 para el radio y de la ecuación 9.10 para el área, al diámetro se llega

gracias a una multiplicación del radio por 2. Estos resultados son mostrados para las pupilas izquierda y derecha en los Cuadros [10.11](#) y [10.12](#).

Cuadro 10.11: Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 4 (pupila izquierda)

| -              | Método            |                   |                         |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Medida         | Diámetro de Feret | Conteo de Píxeles | Circunferencia promedio |
| Radio          | 78px              | 78px              | 84px                    |
| Diámetro       | 156px             | 156px             | 167px                   |
| Área           | 19346px           | 19148px           | 22167px                 |
| Circunferencia | 490px             | 490px             | 526px                   |

Cuadro 10.12: Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en el caso 4 (pupila derecha)

| -              | Método            |                   |                         |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Medida         | Diámetro de Feret | Conteo de píxeles | Circunferencia promedio |
| Radio*         | 75px              | 74px              | 76px                    |
| Diámetro       | 151px             | 148px             | 152px                   |
| Área           | 18092px           | 17024px           | 18146px                 |
| Circunferencia | 478px             | 465px             | 477px                   |

Al estudiar los datos del Cuadro [10.11](#), se pueden obtener los porcentajes de variación tomando como base los resultados que se consiguieron mediante el algoritmo del diámetro de Feret. Así, primeramente, se ve que tanto el radio como el diámetro se mantuvieron sin modificación en el método de conteo de píxeles, en tanto si se opta por el método del promedio de la circunferencia, el radio aumentó un 7.6923 % y el diámetro hizo lo propio en un 7.0513 % siendo estas medidas consistentes. El perímetro tampoco presenta si se compara el diámetro de Feret con el Conteo de píxeles, pero sí si se le compara con la circunferencia promedio: 7.3469 % píxeles de más tiene el método de la circunferencia promedio. Por último, se dejó el área, en donde sí hay cambios entre los tres métodos: 1.0235 % más pequeña resultó al usar el método

del conteo de píxeles, pero su tamaño aumentó hasta en un 14.5818 % en el método de la circunferencia. Esto es plausible dado lo observado en la Figura [10.42b](#), en donde se ve que el contorno suele ser muy irregular, lo cual hace que el promedio para la circunferencia carezca de sentido y más trabajarlo como un círculo, es así que se puede establecer que no es muy aconsejable tratar a las pupilas por su perímetro en figuras de esta naturaleza, debido a que ese quiebre que presenta en la parte norte hace que incluso el contorno se mida en una mayor cantidad de lo que sería un círculo.

Por otra parte, estudiando el Cuadro [10.12](#), presenta una mayor consistencia entre los tres métodos. Si se vuelve a tomar como referencia al método del diámetro de Feret. En lo que respecta al radio, disminuye un píxel (un 1.3333 %) si se hace una comparativa con el método del conteo de píxeles, y aumenta en un píxel (también un 1.3333 %) si se utiliza el método de circunferencia promedio. El diámetro presenta un comportamiento similar: decreta tres píxeles con el conteo de píxeles (1.9868 %) y aumenta en un píxel (0.6623 %) al utilizar la circunferencia promedio. En el área las diferencias son más palpables: una disminución de un 5.9032 %, tomando el conteo de píxeles, y un leve incremento de 0.2985 % al tratarse de la circunferencia promedio. Finalmente, la circunferencia se ve disminuida en un 2.7197 % en el conteo de píxeles, y, curiosamente, un decremento de 0.2092 % en el método de la circunferencia promedio.

Ambas pupilas de este caso dejan en claro un estatus: en general no se puede tratar a las pupilas como circunferencias propias, debido a que estos elementos no presentan tal forma, y se deben contemplar de acuerdo a los datos recabados por la morfología de estas.

Las mediciones de las pupilas quedan ilustradas en la Figura [10.42](#). Si se presta atención a dicha Figura, en especial a las dos inferiores ([10.42c](#) y [10.42d](#)) se puede apreciar que a pesar de lo irregular de la Figura, la estimación que se ha logrado hacer por medio del diámetro de Feret es muy acorde con la superficie rescatada mediante los operadores morfológicos, de hecho,

en la primera imagen esta estimación prácticamente engloba a lo obtenido mediante morfología matemática; en lo que refiere al segundo caso, el de la pupila destruida (pupila izquierda), se distingue que las sombras fueron erradicadas de la Figura rescatada, a pesar de la conexión que presentaban con las pupilas, no sólo eso, la estimación también destaca por encerrar la parte destruida en dicha pupila por el defecto de cutáneo; quedando un poco fuera de la región rescatada por la morfología matemática, pero compensando las pérdidas internas.



(a) Medidas de la pupila derecha en el caso 4, (b) Medidas de la pupila izquierda en el caso 4, perímetro. área.



(c) Medidas de la pupila derecha en el caso 4, (d) Medidas de la pupila izquierda en el caso 4, perímetro.

Figura 10.42: Medidas de ambas pupilas en el Caso 4.

Al ver el caso particular de la Figura [10.42d](#), se deja en claro que esto es una estimación, la cual queda retratada en la imagen original, en la Figura [10.43](#).

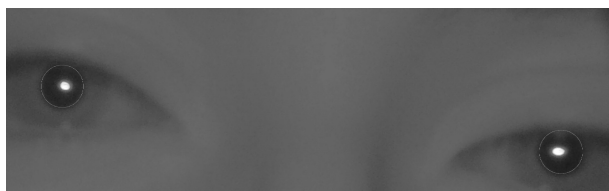


Figura 10.43: Superposición de las pupilas reconstruidas por Feret, en la imagen original del Caso 4.

Nuevamente es destacable que el posicionamiento de las pupilas estimadas coincide con el posicionamiento real de las pupilas en la imagen, no obstante, también se logra distinguir que ha quedado fuera de la estimación una minúscula fracción de cada pupila, algo loable al ver todas las pérdidas del haz de luz, del defecto cutáneo y de las sombras y pestañas que se atravesaron en las pupilas. Para contemplar de mejor forma los defectos que pudieron afectar la reconstrucción y medición de las pupilas, se presenta la Figura [10.44](#).

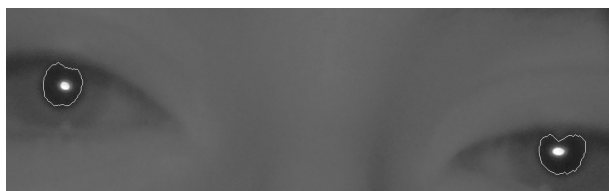


Figura 10.44: Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen original del Caso 3.

Analizando la Figura [10.44](#), se destaca que de la pupila izquierda se bordea perfectamente lo que es el defecto cutáneo, y se captura en esencia todo lo que es pupila, no obstante, esto sí termina por pasar factura en la reconstrucción, al entregar una figura circular que no alcanza a cubrir la pupila en su totalidad (como se vio en la Figura [10.43](#)). De la otra pupila, se ve en la parte superior que sí terminaron por mermar a la medida las propias pestañas, puesto que para el procesamiento morfológico no se pudieron distinguir a estas de la pupila, por lo que se tenía que elegir entre estas o mantener a ambas, lo cual



podría ser contraproducente, dado que rescataría al resto de las pestañas y harían de estas medidas unas completamente erradas. Estos defectos quedan mejor evidenciados en la Figura [10.45](#).



Figura 10.45: Región identificada de las pupilas mediante el algoritmo propuesto, en la imagen pre-procesada del Caso 4.

Al mirar minuciosamente la Figura [10.45](#) se pueden distinguir, mediante los niveles de grises, que las pestañas y las sombras también jugaron un papel determinante al momento de la segmentación, sobre todo en la pupila izquierda, pues el contorno (la parte más pegada al iris), puede mezclarse con los niveles de gris generados por estos elementos, lo cual también hace de estos elementos un factor que debe considerarse al momento de la captura, si no se desea trabajar en el procesamiento de las imágenes. Por último se hace un acercamiento a ambas pupilas en la Figura [10.46](#).



(a) Estimación por Feret de la pupila derecha. (b) Estimación por Feret de la pupila izquierda.

Figura 10.46: Diámetros de Feret marcados en el caso 4.

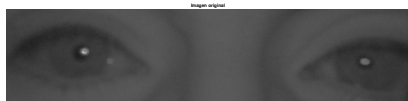
La Figura [10.46](#) deja de testigo que la aproximación realizada fue muy cercana a las pupilas del paciente, fallando por medidas micrométricas, un gran paso respecto al compararlo con el fallo que puede presentar el juicio y la

visión de un especialista y un resultado que es comparable al de pupilómetros más costosos.

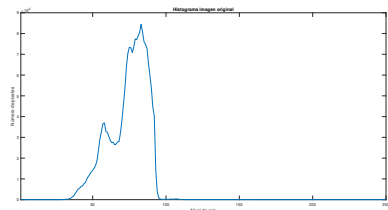
## 10.5. Caso 5: pupila insalvable

**Descripción del caso:** el voluntario en este caso es un varón de 54 años, sin historial clínico previo (referente a la oftalmología), de quien se sospecha que puede ser un caso de miosis e incluso pudiera padecer Síndrome de Horner (pupilas no reactivas). Las condiciones de captura fueron: a 50 cm de separación entre la cámara y el participante, la iluminación fue con luz natural en un horario nocturno, en una habitación cerrada.

La imagen capturada para la demostración de este caso puede verse en la Figura 10.47, acompañada por su histograma, la misma imagen, ya pre-procesada y el histograma de esta última. Como comentario adicional, se utilizaron los mismos valores de pre-procesamiento que en los cuatro casos anteriores.



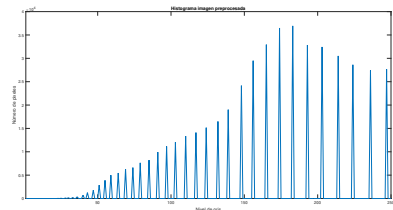
(a) Imagen del quinto caso.



(b) Histograma de la imagen original del quinto caso.



(c) Imagen pre-procesada del quinto caso.



(d) Histograma de la imagen pre-procesada del quinto caso.

Figura 10.47: Imágenes del quinto caso y del resultado del pre-procesamiento, acompañadas por sus histogramas.

Prueba del comentario anterior es que si se comparan los histogramas de las Figuras 10.47b y 10.47d, se observa que se optó por rescatar el primer pico y el primer valle. Lo interesante en este caso es que las pupilas están tan contraídas que apenas y logran superar el tamaño del reflejo de luz infrarroja, también es interesante ver la situación de que las sombras en este caso tienen un tamaño prominente para lo que representan las pupilas, si bien en las otras pupilas también hay sombras, estas no suponen un tamaño considerable al compararlas con las pupilas.

Otra situación a remarcar es que el reflejo de luz en la pupila derecha del paciente (lado izquierdo de la imagen) está muy cerca del borde con lo que se da por hecho que habrá una destrucción de esta.

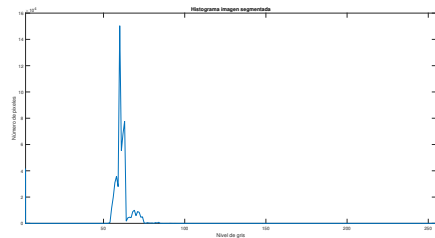
Teniendo presentes estas notas, es posible pasar al procedimiento de recuperación de las pupilas.

### 10.5.1. Recuperación de las pupilas

Al aplicar el operador de la última apertura única a la imagen retratada en la Figura 10.47c, se obtiene la imagen de la Figura 10.48a.



(a) Resultado de la última apertura única en el quinto caso.



(b) Histograma de la imagen mostrada en la Figura 10.48a

Figura 10.48: Efectos de la última apertura única, en el quinto caso.

El espectro que se observa en la Figura 10.48b indica que la mayor cantidad de información se concentra en el segundo pico, no obstante, como lo que se busca son las tonalidades oscuras, entonces se procede a rescatar el primer pico y el primer valle, debido a que, bajo las condiciones de la plataforma de

captura, es en donde se encontraron todas las pupilas de todos los casos analizados, en este caso, como se demuestra en la Figura 10.49, no se presentó una situación diferente.

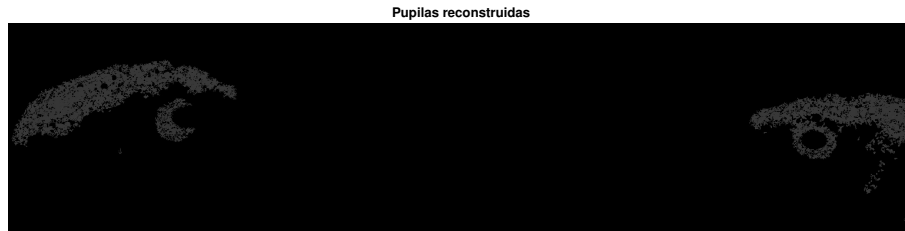
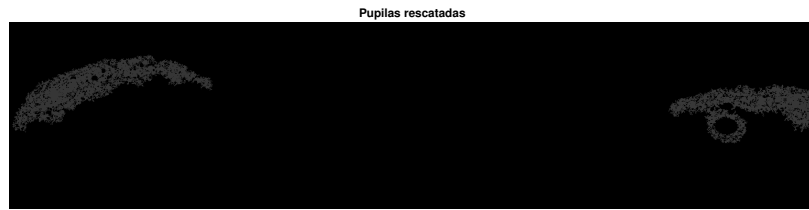


Figura 10.49: Segmentación de las pupilas del quinto caso.

Desde la Figura 10.49 se logra apreciar un problema a manera de premonición, pues es notorio que las pupilas representan una pequeña porción de los componentes de la imagen, comparadas con las sombras que también pasaron esta primera etapa de filtrado.

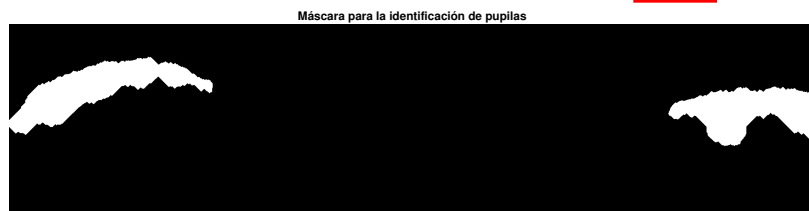
Para reconstruir sólo las pupilas se emplea, al igual que en todos los casos, la reconstrucción geodésica con el marcador creado a partir de la ecuación 9.3, no obstante, se adelanta una cuestión: la distancia entre  $pm$  y los otros cuatro puntos, debe de ser muy pequeña, por tal motivo es muy posible que se termine por rescatar no solo las pupilas, sino también las sombras. Al aplicar el proceso de reconstrucción geodésica se obtiene lo visto en la Figura 10.50a.



(a) La base de las pupilas que se van a rescatar.



(b) Relleno de las base mostrada en la Figura 10.50a.



(c) Máscara creada para el caso 5.

Figura 10.50: Creación de la máscara para el rescate de pupilas, en el quinto caso.

Si se estudia dicha Figura, se observa el principal conflicto de este caso: se rescataron las sombras y no así la pupila derecha (ya destruida por el reflejo de luz infrarroja), es probable que se pueda rescatar esta otra pupila, pero las sombras también serían rescatadas en mayor medida, dado que estarían dentro del marcador, aunado a esto, las propias sombras son elementos conectados (véase en la pupila izquierda) con las pupilas, por lo que este proceso de reconstrucción carecería de sentido, algo que ya ocurre si se contempla la Figura 10.50 en su totalidad.

Si se emplea la máscara de la Figura 10.50c para recortar la imagen pre-procesada se obtiene la Figura 10.51.



Figura 10.51: Resultado de la obtención de las pupilas en el caso 5.

Estudiando el caso completo se puede llegar a dos conclusiones:

- Las pupilas son demasiado pequeñas para soportar una destrucción del haz de luz infrarroja, por lo que se recomienda que esta esté en el centro y, a pesar de ello, se corre el riesgo de que se vea destruida por su escasa diferencia respecto a la superficie de este reflejo.
- Las pupilas también deben de ser distinguibles, en cuanto a tamaño y forma, de las sombras que se pudieran presentar, debido a que no es posible que con el marcador creado a partir de 9.3 las marque como tales sin marcar también a las sombras como potenciales pupilas, de hecho, se utilizó en este caso otro algoritmo basado en erosiones sucesivas (hasta dejar el mínimo de elementos disponibles en cada región) y no se pudo rescatar a ambas pupilas, excepto a las sombras.

Debido a la imposibilidad de salvar estas pupilas no procede la medición de las pupilas. Estos son pues, los cinco casos destacados que se quisieron abordar como ejemplo de los algoritmos.

## 10.6. Análisis general

En esta sección se comentan los aspectos de la calibración y conversión de píxeles a centímetros. Igualmente se hace un resumen de los resultados generales que se obtuvieron de todo el universo estudiado. También se comenta

sobre los índices normalizados de las pupilas, tanto por su área como por su perímetro.

### 10.6.1. Procedimiento de conversión de píxeles a milímetros

Para llevar a cabo el proceso de calibración y conversión, se empleó un modelo a una escala conocida: dicho modelo comprende una serie de círculos concéntricos cuyo diámetro va desde  $1\text{mm}$  hasta los  $10\text{mm}$ , también se hace mediante una serie de líneas que se encuentran en dicho rango.

Los círculos se ven repetidos en distintas posiciones de un marco, para determinar las mediciones y obtener un promedio, lo mismo ocurre con el patrón de líneas, de tal suerte que la red de calibración es la presentada en la Figura 10.52.

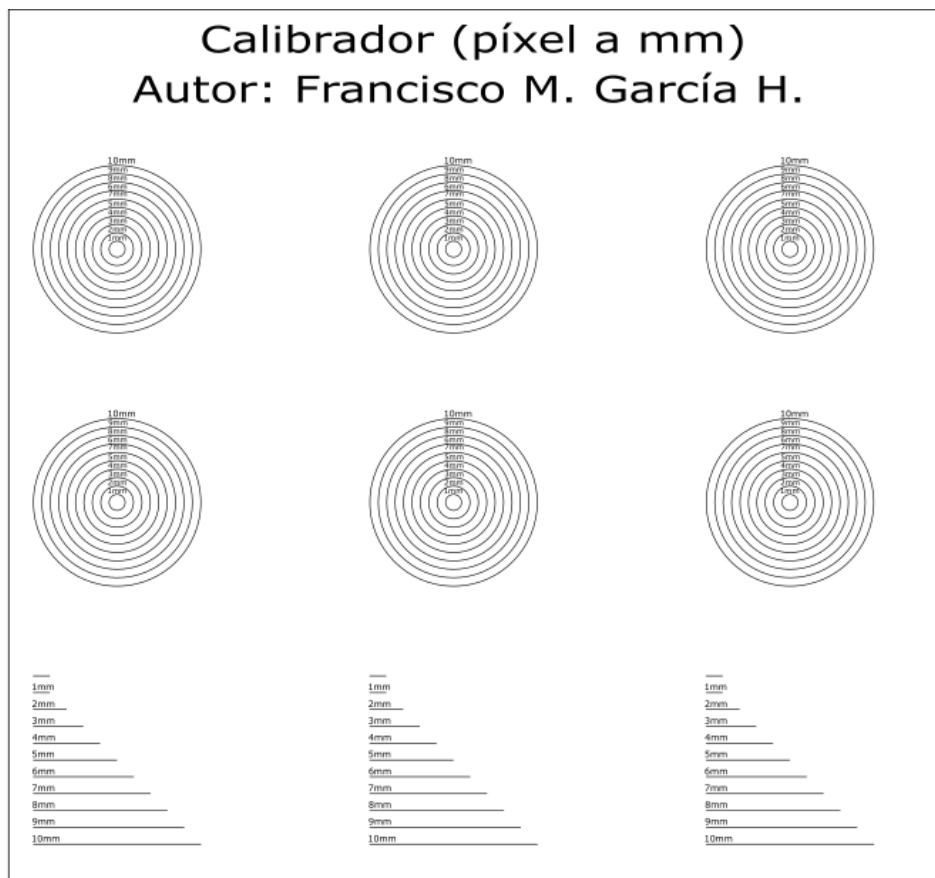


Figura 10.52: Red de calibración para la conversión de píxeles a milímetros.

El proceso de conversión consistió en determinar cuánto miden distintas longitudes milimétricas en términos de píxeles.

Los pasos para la calibración son los siguientes:

- La red observada en la Figura 10.52 se coloca hasta en 12 ocasiones en una misma parrilla (hoja).
- Se deben tomar hasta 5 fotografías a una misma distancia de la parrilla de 12 calibradores en una misma hoja, con la misma configuración que se ha utilizado para las fotografías de las pupilas.
- Se repite el proceso a distintas distancias equidistantes (por ejemplo, separando la cámara  $10\text{cm}$  entre distancia y distancia), esto con el fin de poder obtener el equivalente en píxeles de las medidas a diferentes longitudes.
- Se obtiene el diámetro horizontal y vertical de todos los círculos de toda la parrilla al completo: en total serán 720 círculos (72 círculos para cada diámetro, aportando un conjunto de círculos, 10 diámetros cada uno) y 36 patrones de líneas por fotografía.
- Se calcula el diámetro promedio de cada uno de los círculos y el promedio de cada línea por fotografía.
- Se obtiene el promedio de los diámetros y las líneas del conjunto de fotografías a una misma distancia (por ejemplo, la cámara ubicada a  $40\text{cm}$  de la parrilla).
- Se registra el equivalente en píxeles de cada medida ( $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$ ,  $\dots$ ,  $10\text{mm}$ ) para todas las distancias en las que se coloca la cámara, respecto a la parrilla.
- se aplica la regla de tres con el promedio final, para convertir de píxeles a milímetros.



Como nota adicional, para obtener los diámetros horizontal y vertical se empleó un proceso similar a la estimación de los diámetros máximos “d1” y “d5” (véase Figura 9.12), pero en este caso para cada círculo, por lo que se empleó la reconstrucción geodésica para separar cada círculo del conjunto.

La razón principal para hacer una parrilla radicó en la posibilidad de reducir sesgos por la concavidad de los lentes, es decir, que en los bordes las imágenes fuesen más alargadas, no obstante, al hacer los promedios, se veía que los círculos no presentaban variación, independientemente de su ubicación dentro de la parrilla.

Con esto es posible dar paso a los resultados en milímetros de todas las pupilas observadas.

#### **10.6.2. Medidas obtenidas de la base de datos**

En este apartado se muestran las medidas de los cuatro casos analizados previamente, sólo que en esta ocasión ya se muestran convertidos a milímetros, en concreto, se muestran el diámetro, el área y el perímetro.

Cuadro 10.13: Medidas de las áreas, perímetros, diámetros en milímetros

| Medida                          | Método            |         |                   |         |                         |         |
|---------------------------------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------------|---------|
|                                 | Diámetro de Feret |         | Conteo de píxeles |         | Circunferencia promedio |         |
| <b>Caso 1</b>                   | PI                | PD      | PI                | PD      | PI                      | PD      |
| Diámetro ( <i>mm</i> )          | 4.4638            | 4.3478  | 4.4058            | 4.1739  | 4.3768                  | 4.2029  |
| Circunferencia ( <i>mm</i> )    | 14.0233           | 13.6591 | 13.8412           | 13.1127 | 13.7502                 | 13.2038 |
| Área ( <i>mm</i> <sup>2</sup> ) | 15.6492           | 14.8468 | 15.2454           | 13.6829 | 15.0455                 | 13.8736 |
| <b>Caso 2</b>                   | PI                | PD      | PI                | PD      | PI                      | PD      |
| Diámetro ( <i>mm</i> )          | 6.3861            | 5.8911  | 6.2376            | 5.7921  | 6.3366                  | 5.8416  |
| Circunferencia ( <i>mm</i> )    | 20.0626           | 18.5074 | 19.5961           | 18.1964 | 19.9071                 | 18.3519 |
| Área ( <i>mm</i> <sup>2</sup> ) | 32.0307           | 27.2572 | 30.5582           | 26.3487 | 31.5360                 | 26.8010 |
| <b>Caso 3</b>                   | PI                | PD      | PI                | PD      | PI                      | PD      |
| Diámetro ( <i>mm</i> )          | 7.2973            | 6.9595  | 7.1284            | 6.8581  | 7.2466                  | 7.0777  |
| Circunferencia ( <i>mm</i> )    | 22.9251           | 21.8638 | 22.3945           | 21.5454 | 22.7659                 | 22.2353 |
| Área ( <i>mm</i> <sup>2</sup> ) | 41.8229           | 38.0400 | 39.9090           | 36.9401 | 41.2440                 | 39.3436 |
| <b>Caso 4</b>                   | PI                | PD      | PI                | PD      | PI                      | PD      |
| Diámetro ( <i>mm</i> )          | 4.5217            | 4.4058  | 4.5217            | 4.2899  | 4.8406                  | 4.4058  |
| Circunferencia ( <i>mm</i> )    | 14.2055           | 13.8412 | 14.2055           | 13.4770 | 15.2071                 | 13.8412 |
| Área ( <i>mm</i> <sup>2</sup> ) | 16.0583           | 15.2454 | 18.4028           | 15.2454 | 16.0583                 | 14.4536 |

Como nota adicional: PD significa pupila derecha y PI es pupila izquierda, siempre rotuladas de acuerdo al posicionamiento de la pupila en el rostro del paciente y no en su ubicación de la imagen.

Dentro de los comentarios que se pueden añadir al análisis de esta tabla están que, entre más completas se recuperen las pupilas, menos variación muestran entre los tres métodos. Otro aspecto relevante es que la variación en milímetros suele ser menor que en píxeles, con lo que la resolución del pupilómetro se ve confinada dependiendo de a cuántas cifras se redondee el

cálculo, no obstante sí que pueden presentarse variaciones en términos nomométricos.

Otro punto es el recalcar que cuando las figuras recuperadas no son exactas, el método que más variaciones presenta es el de conteo de píxeles, pues depende de la superficie recuperada.

En el caso de pupilas grandes, las diferencias percibidas pueden ser más sutiles, incluso entre pupilas y métodos, véanse los resultados del caso 2 y 3.

Por último, es importante recalcar que el alcance de este pupilómetro, de momento, es entregar medidas de las pupilas y no diagnosticar la anisocoria, por lo cual se ha prescindido de una presentación de las diferencias entre las pupilas.

Cabe remarcar que el resto de pupilas analizadas y almacenadas en la base de datos se encontraban, en cuanto a diámetro se refiere, desde los  $2.45mm$  hasta alcanzar los  $7.2973$ , y que la distancia mínima a la que se pudieron rescatar medidas fue justamente desde los 10 centímetros, por cuestiones de distancia focal, y la máxima distancia, sin presentar distorsiones y variaciones entre imagen e imagen, fue de 75 centímetros, en un intervalo de confianza del 95 %. Lo que resta es presentar los índices normalizados de este conjunto de pupilas destacables.

## 10.7. Índices normalizados de las pupilas

Esta sección muestra los resultados para los casos visibles (el resto de los casos generados en la base de datos se mantienen como confidenciales por asuntos de privacidad en cumplimiento con las pautas establecidas ante el comité de ética).

Todos los datos quedan registrados en el Cuadro [10.14](#), cabe resaltar que para ello se emplearon las ecuaciones [8.1](#), [8.2](#), [8.3](#), [8.4](#) y [8.5](#), para los tres métodos de medición. De nuevo recordar que estas ecuaciones fueron utilizadas en el trabajo [\[4\]](#). Así pues, los resultados se muestran en el Cuadro [10.14](#).

Cuadro 10.14: Índices normalizados de las pupilas

| -             | Método                 |                   |                |
|---------------|------------------------|-------------------|----------------|
|               | Diámetro de Fe-<br>ret | Conteo de píxeles | Circunferencia |
| <b>Caso 1</b> |                        |                   |                |
| PP ( $mm^2$ ) | 15.2454                | 14.4536           | 14.4536        |
| iipr          | 0.9739                 | 0.9467            | 0.9599         |
| iipl          | 1.0265                 | 1.0548            | 1.0410         |
| nidp          | 0.0526                 | 0.1081            | 0.0811         |
| nipp          | 1.0267                 | 1.0556            | 1.0414         |
| <b>Caso 2</b> |                        |                   |                |
| PP ( $mm^2$ ) | 29.5958                | 28.4145           | 29.1204        |
| iipr          | 0.9210                 | 0.9273            | 0.9204         |
| iipl          | 1.0823                 | 1.0754            | 1.0830         |
| nidp          | 0.1613                 | 0.1481            | 0.1626         |
| nipp          | 1.0840                 | 1.0769            | 1.0847         |
| <b>Caso 3</b> |                        |                   |                |
| PP ( $mm^2$ ) | 39.9090                | 38.4103           | 40.2882        |
| iipr          | 0.9532                 | 0.9617            | 0.9766         |
| iipl          | 1.0480                 | 1.0390            | 1.0237         |
| nidp          | 0.0948                 | 0.0773            | 0.0472         |
| nipp          | 1.0485                 | 1.0394            | 1.0239         |
| <b>Caso 4</b> |                        |                   |                |
| PP ( $mm^2$ ) | 15.6492                | 15.2454           | 16.7870        |
| iipr          | 0.9742                 | 0.9481            | 0.9082         |
| iipl          | 1.0261                 | 1.0533            | 1.0963         |
| nidp          | 0.0519                 | 0.1053            | 0.1881         |
| nipp          | 1.0263                 | 1.0541            | 1.0987         |

De acuerdo con los datos del Cuadro [10.14](#), se puede establecer, mediante análisis general, que el método que suele presentar mayor variación entre los índices izquierdo y derecho de las pupilas es el método de conteo de píxeles, pues tanto el iipr como el iipl se alejan en mayor medida de la unidad, es importante remarcar ante esto que cada método está comparado en su desem-

peño entre sus propios datos, no de forma cruzada.

En lo particular, en las pupilas que muestran deformaciones, el método de circunferencia es el que suele mostrar mayor inconsistencia entre estos dos índices.

Sobre la detección de diferencias entre las pupilas, el método que se muestra más reacio a presentarlas es el del diámetro de Feret, puesto que, por ejemplo, en el caso 2 es el único que establece que pudiera haber cierto grado de anisocoria, en cambio, los otros dos métodos incluso muestran un grado de anisocoria significativa en el caso 4 y en el caso 1.

Tras este breve análisis de los índices, es preciso dar paso a las conclusiones generales del presente trabajo.

## **10.8. Aplicaciones y productos generados**

En este apartado se muestran algunos de los productos que se lograron rescatar del presente trabajo, así como también se hace una semblanza sobre las aplicaciones que puede tener.

### **10.8.1. Aplicaciones:**

Es importante remarcar que este prototipo consta de la generación de algoritmos de morfología matemática y del montaje de la plataforma experimental. Por lo que lo producido se puede especificar en:

- Principalmente es un prototipo que permite extraer y medir pupilas y clasificarlas de acuerdo a criterios del oftalmólogo como tamaño y edad, no permite diagnosticar ninguna anomalía en ellas, tampoco permite la identificación y medición de pupilas en directo (directamente de lo observado por la cámara).
- La plataforma de captura permite obtener fotografías de las pupilas de forma no invasiva con una resolución de 24 Mp, o videos de 1080p, en

cualquier tipo de condiciones de iluminación, en un rango de distancia que va desde los 10 centímetros hasta 75 centímetros, sin hacer zoom digital: a mayor distancia se corre el riesgo de perder el enfoque, debido a que se sale de la distancia focal para la cual se diseñó la plataforma.

#### **10.8.2. Productos derivados:**

1. Se participó en el Congreso Internacional de Ingeniería (CONIIN) de la Universidad Autónoma de Querétaro.
2. Se elaboró un artículo titulado *Digital Image Processing-based Methodology for a Pupillometer* para la revista *IEEEExplore*.

# Capítulo 11

## Conclusiones

En este capítulo se abordan las conclusiones del trabajo, como primera instancia y también se da espacio para una breve discusión sobre el trabajo futuro.

### 11.1. Conclusiones

En el actual apartado se da lugar a las conclusiones, enlistadas a continuación:

- El algoritmo presentado es capaz de generar resultados que se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño y a los valores de los índices, para determinar si existen diferencias de tamaño entre las pupilas; permitiendo un análisis hasta en un 95 % de los casos que se deseen medir, sin embargo, la tarea de la clasificación en lo que se refiere a padecimientos oculares, sigue dependiendo del conocimiento de especialistas, quienes pueden encontrar en los operadores morfológicos una herramienta que les otorga una precisión (en términos de diferencias y de mediciones) que llega hasta el rango de los nanómetros, diferencias imposibles de obtener a simple vista y que se consideran accesibles tomando en cuenta el costo de los dispositivos especializados y comparándolo con la plataforma de adquisición que se construyó en este trabajo, convirtiéndose en

un aliado incluso para estudiantes de oftalmología, quienes se ven más limitados en términos de recursos.

- Mediante un análisis granulométrico realizado a partir de operadores morfológicos y de la última apertura única (vista en 9.2) fue posible detectar las pupilas y distinguirlas incluso de entre efectos de la imagen como sombras generadas por las comisuras de los párpados, pestañas caídas o defectos en el párpado (como fue visto en el caso 4), dejando una base de la pupila que abre la posibilidad de reconstruirla mediante los algoritmos de medición y filtros deslizantes. Funciona incluso en imágenes completas, capturadas con luz infrarroja y filtros apropiados para esta longitud de onda (sin verse afectado por las condiciones de iluminación, al ser estas solventadas por las características de tales filtros); pero es preferible recortar las propias imágenes, para ahorrar carga computacional y memoria, debido a que, tanto MATLAB como cualquier otro lenguaje, reservan memoria para trabajar las matrices de acuerdo a su tamaño.
- Uno de los aspectos principales por los que se optó por limitar el rescate de las pupilas (una vez trabajadas con la última apertura única) al primer pico fue para automatizar el procedimiento y que fuese compatible con hasta un 95 % de las pupilas estudiadas; es posible, que el uso de una red neuronal, a partir de subsecuentes análisis granulométricos consecutivos adaptados a cada par de pupilas estudiadas, acotara poco a poco el espectro resultante de aplicar la última apertura, garantizando así que, para cada imagen se rescatara un poco más de elementos que conformaran la pupila, para que no se diesen casos como el quinto, de modo que sería posible rescatar mayor cantidad de pupila destruida por el reflejo del haz de luz infrarroja; no obstante, hacer análisis consecutivos aumentaría el costo computacional, con lo que el algoritmo podría volverse más lento.
- Entre los tres métodos presentados (diámetro de Feret, conteo de píxe-



les y perímetro), se detectó una diferencia de hasta 12.31 %, respecto al diámetro de Feret, no obstante, existen varios matices que se deben considerar: el análisis mediante morfología matemática (aunado a las naturaleza de las propias imágenes, principalmente debido al ruido inherente) arrojó que estos elementos no son círculos perfectos, situación comprobable a través del conocimiento de oftalmólogos, desde circunstancias como la operación para solucionar problemas como la miosis, pues las propias pupilas pueden ser modificadas en su forma al ser intervenidas de esta manera o derivado de algún trauma [67]. Esta circunstancia hace que el método de estimación del área por medio del perímetro carezca de rigurosidad matemática quedándose en una estimación, al no estar trabajando con una figura geométrica definida. Por otro lado, la estimación del área y del perímetro por medio del conteo de píxeles depende bastante de qué tan fiel sea la recuperación de la pupila, es decir, que no se vea destruida como en los casos 3 y 4, puesto que así presenta un sesgo que no se puede solventar, incluso a pesar del método que se encarga de reconstruirlas, mediante aperturas y cerraduras deslizantes; una solución provisional que puede mitigar el problema consiste en evitar que el reflejo del haz luminoso no incida en los bordes de la pupila y se encuentre ya sea fuera de esta o en el centro. Por otra parte, es posible distinguir que el método del diámetro de Feret permitió una recuperación más viable de las pupilas al colocar el círculo generado a partir de dicho diámetro en el centro de la pupila.

- Respecto al último aspecto tocado en el punto anterior, el algoritmo de medición mediante el diámetro de Feret es capaz de medir ignorando por completo irregularidades como la iluminación o defectos cutáneos y posiblemente permite reconstruir la pupila en su totalidad, (ejercicio no tocado en el presente trabajo), dando medidas más cercanas a las reales con mayor precisión de lo que haría el experto mediante una regla, observación y criterio, debido a que se analizan las estructuras a nivel píxel; no

obstante, es importante matizar esta aseveración: se sigue tratando a este elemento de estudio (la pupila) como círculo geométrico, para mayor conveniencia (en lo que concierne a los otros dos métodos de medición), atendiendo a los métodos que utilizan los especialistas [17]; también es importante acotar que dicha conveniencia sólo se hace para obtener medidas como el perímetro o el diámetro promedio, pues la medición del área suele ser más certera y comparable entre los tres métodos, además de que esta última es el principal objetivo de la herramienta principal (el diámetro de Feret).

- Las variaciones de mediciones vistas entre cada una de las capturas de un mismo par de pupilas no sobrepasaron el 8.2 % a una misma distancia, debido a que, a diferentes distancias, las pupilas varían en la cantidad de píxeles que abarcan: entre más cercanas se encuentren de la cámara mayor cantidad de píxeles de la imagen ocuparán, siempre para una misma resolución. La diferencia del 8.2 % se presentó en distancias mayores a 80 cm, por lo que esto puede identificarse como un área de oportunidad para un futuro trabajo: disminuir la diferencia en distancias mayores, en donde las pupilas constituyen una menor superficie de la imagen; esta situación se puede apalear utilizando cámaras de mayor costo que posean zoom óptico (o analógico) como fueron los resultados presentados en [4], no obstante, el zoom digital no ayuda si no a agrandar los píxeles de la imagen, haciendo que se deforme la misma.
- Bajo las condiciones de captura utilizadas en el trabajo, en lo referente a la composición de la plataforma (en cuanto a iluminación y filtros), fue suficiente con discos (elementos estructurantes) de tamaño máximo de  $i = 5$ , aunque incluso con  $i = 3$  se obtuvieron resultados muy convincentes, puesto que aportaban la mayor cantidad de información, de acuerdo al análisis granulométrico (véase Figura 9.9); el utilizar elementos estructurantes más pequeños ocasionan que la imagen permanezca

inalterada, el utilizar algunos de dimensiones mayores, generan que la división entre la pupila y el iris se difumine, lo que altera las mediciones, por tal motivo, es recomendable generar un estudio granulométrico sólo en una condición única de iluminación puesto que el mismo tamaño de disco funciona a cualquier distancia, considerando el inconveniente de que a mayor distancia la segmentación resulta ser menos precisa, a pesar de que los estudios granulométricos a todas las distancias generaban gráficas granulométricas muy similares. Este problema se puede mitigar utilizando una cámara con zoom óptico, en lugar de zoom digital, como ya se comentó en un punto anterior.

- Los tiempos de ejecución del algoritmo son, en promedio de 15.2919 segundos, tomando en cuenta desde el pre-procesamiento, la segmentación, hasta la medición, por medio de los tres métodos), para imágenes de una cantidad de 770 por 3131 píxeles (Considerando un procesamiento de 40 imágenes).
  - El proceso de segmentación de las pupilas dura en torno a los 7.401 segundos
  - El proceso de medición tiene una duración en torno a los 7.6649 segundos
- Del total de casos analizados (20), 2 de ellos fueron irrecuperables, por condiciones de pre-procesamiento, englobando en esta etapa a las condiciones de captura y reflejos: en uno las condiciones de iluminación ocasionaron que fuera imposible identificar a las pupilas dentro del espectro, puesto que estas se dispersaron a lo largo del mismo ya una vez empleada la última apertura única, sin importar las diferentes condiciones (mejoras de contraste, aumento de brillo) a las que fueron sometidas las distintas imágenes del mismo caso; para resolver este problema es muy importante limitar la iluminación solo a la luz infrarroja para evitar una mayor cantidad de ruido en las imágenes a procesar. El otro caso

irrecuperable fue presentado en el caso 5 (pupilas demasiado pequeñas para distinguirse del reflejo de luz).

- Las imágenes oscuras son destruidas, las imágenes claras pierden información (el pre-procesamiento es importante). Esto es debido a la naturaleza del operador de la apertura, tiende a oscurecer las imágenes, eliminando los elementos con menos brillo (las pupilas tienden a colores oscuros). Por otro lado, tampoco se deben tener imágenes que tiendan a los claros, debido a que, para aislar las pupilas (mediante operadores de multiplicación, potencia y suma, para aumentar el brillo y generar una distribución en el espectro), se puede perder la información que tiende al blanco (al nivel 255), lo cual es de vital importancia debido a que las pupilas tienden a conservar el reflejo de la luz infrarroja en su estructura interna, situación que puede complicar su recuperación una vez dada la segmentación.
- Para lograr la automatización absoluta se debe recaer en el uso de operadores morfológicos, atendiendo principalmente a la recursividad para, mediante distintos análisis granulométricos consecutivos y el uso de las transformaciones geodésicas, así como de la última apertura única, sea posible reconstruir cualquier pupila de forma más precisa y eliminar la dependencia tajante a una plataforma de captura específica.

## **11.2. Trabajo futuro**

El trabajo futuro se puede abordar desde dos frentes:

### **1. Trabajo teórico:**

- a) El algoritmo de la última apertura única se puede trasladar a otras áreas (incluso ya estudiadas), de modo que no se dependa de tanto de un análisis granulométrico, debido a que, a diferencia de este, sus

límites están más definidos en las regiones de interés (la reducción de iris es susceptiblemente mayor, en este caso).

- b)* Es posible realizar algunas variantes en la composición de los subconjuntos variando ligeramente el criterio de selección, sin perder el enfoque de su funcionamiento morfológico, incluso, se puede apelar en una investigación a la mejora de precisión mediante operadores como el gradiente.
- c)* Una comparativa mediante operadores enfocados a la hiperconectividad, para analizar el comportamiento en imágenes de este tipo (con carencias en la resolución y el acercamiento), para poder distinguir no sólo la pupila, sino también el iris.

## **2. Trabajo práctico:**

- a)* Se puede buscar el trasladar el(los) algoritmo(s) a un sistema embebido como una Raspberry Pi, o bien, algún microcontrolador de la familia STM, de modo que se genere un dispositivo tangible y susceptible de ser patentado, en términos de clasificación y precisión de las medidas.
- b)* Hay espacio para su adaptación a otros entornos como *OpenCV* e incluso su aportación a otros lenguajes de programación como *C*, de modo que se consiga un ahorro mucho mayor en términos de tiempo y procesamiento, debido a que Matlab depende mucho de funciones predeterminadas.

# Bibliografía

- [1] A. A. of Ophthalmology, K. Boyd, D. Turbert, and R. H. J. Jr. (2019) Partes del ojo. [Online]. Available: <https://www.aaopt.org/salud-ocular/anatomia/partes-del-ojo>
- [2] J. R. Gross, C. M. McClelland, and M. S. Lee, “An approach to anisocoria,” *Current Opinion in Ophthalmology*, vol. 27, no. 6, pp. 486–492, Nov. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1097/icu.0000000000000316>
- [3] P. Medical. (2010) Medimeter medical ruler. [Online]. Available: <https://www.prestigemedical.com/>
- [4] M. Gallegos-Duarte, J. D. Mendiola-Santibanez, D. Ibrahim, C. Paredes-Orta, J. Rodriguez-Resendiz, and C. A. Gonzalez-Gutierrez, “A novel method for measuring subtle alterations in pupil size in children with congenital strabismus,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 125 331–125 344, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3007873>
- [5] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 2nd ed. Prentice Hall, 2002.
- [6] P. Soille, *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*, 2nd ed. Springer-Verlag, 2004.
- [7] J. Q. Truong and K. J. Ciuffreda, “Quantifying pupillary asymmetry through objective binocular pupillometry in the normal and mild

- traumatic brain injury (mTBI) populations,” *Brain Injury*, vol. 30, no. 11, pp. 1372–1377, Aug. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/02699052.2016.1192220>
- [8] K. Siminou and Neuroptics, “Methods, systems, and devices for monitoring anisocoria and asymmetry of pupillary reaction to stimulus,” *Patent No. US8534840*. Washington, DC U.S. Patent and Trademark Office, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/US8534840>
- [9] A. A. of Ophthalmology, K. Boyd, D. Turbert, and S. N. L. MD. (2020) ¿qué es el estrabismo del adulto? [Online]. Available: <https://www.aaopt.org/salud-ocular/enfermedades/estrabismo>
- [10] S. A. Kennedy, J. Noble, and A. M. F. Wong, “Examining the pupils,” *Canadian Medical Association Journal*, vol. 185, no. 9, pp. E424–E424, Feb. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1503/cmaj.120306>
- [11] I. Pérez, “Estudio del esparcimiento de la luz en el ojo humano,” Ph.D. dissertation, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Sep. 2011.
- [12] J. Yu, H. Yoon, Y. M. Khalifa, and S. Y. Emelianov, “Design of a volumetric imaging sequence using a vantage-256 ultrasound research platform multiplexed with a 1024-element fully sampled matrix array,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 67, no. 2, pp. 248–257, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/tuffc.2019.2942557>
- [13] M. Berman, M. Hamblin, and P. Chazot, *Rhythmic stimulation procedures in neuromodulation*, 1st ed. Academic Press-Elsevier, 2017.
- [14] B. Kaye, “Some aspects of the efficiency of statistical methods of particle size analysis,” *Powder Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 97–110,

- Dec. 1968. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(68\)80044-0](https://doi.org/10.1016/0032-5910(68)80044-0)
- [15] D. K. Mojumder, S. Patel, K. Nugent, J. Detoledo, J. Kim, N. Dar, and H. Wilms, “Pupil to limbus ratio: Introducing a simple objective measure using two-box method for measuring early nisocoria and progress of pupillary change in the ICU,” *Journal of Neurosciences in Rural Practice*, vol. 6, no. 02, pp. 208–215, Feb. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4103/0976-3147.153229>
- [16] H. Wilhelm, T. Peters, H. Lüdtkke, and B. Wilhelm, “The prevalence of relative afferent pupillary defects in normal subjects,” *Journal of Neuro-Ophthalmology*, vol. 27, no. 4, pp. 263–267, Dec. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1097/wno.0b013e31815bf865>
- [17] S. Gholami, N. J. Reus, and T. J. van den Berg, “The significance of changes in pupil size during straylight measurement and with varying environmental illuminance,” *Journal of Optometry*, vol. 11, no. 3, pp. 167–173, Jul. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.optom.2017.08.004>
- [18] S. Narayana and S. McGee, “Bedside diagnosis of the ‘red eye’: A systematic review,” *The American Journal of Medicine*, vol. 128, no. 11, pp. 1220–1224.e1, Nov. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2015.06.026>
- [19] J. Silbert, N. Matta, J. Tian, E. Singman, and D. I. Silbert, “Pupil size and anisocoria in children measured by the plusoptiX photoscreener,” *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, vol. 17, no. 6, pp. 609–611, Dec. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jaapos.2013.09.003>
- [20] A. D. Freeman, C. E. McCracken, and J. A. Stockwell, “Automated pupillary measurements inversely correlate with increased intracranial pres-



- sure in pediatric patients with acute brain injury or encephalopathy,” *Pediatric Critical Care Medicine*, vol. Publish Ahead of Print, Mar. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1097/pcc.0000000000002327>
- [21] L. J. Zheng, J. Mountstephens, and J. Teo, “Four-class emotion classification in virtual reality using pupillometry,” *Journal of Big Data*, vol. 7, no. 1, Jul. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00322-9>
- [22] T. A. Shazly and G. R. Bonhomme, “A simple infrared-augmented digital photography technique for detection of pupillary abnormalities,” *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, vol. 253, no. 3, pp. 487–490, Jan. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00417-014-2924-8>
- [23] C. L. Kramer, A. A. Rabinstein, E. F. M. Wijdicks, and S. E. Hocker, “Neurologist versus machine: Is the pupillometer better than the naked eye in detecting pupillary reactivity,” *Neurocritical Care*, vol. 21, no. 2, pp. 309–311, May 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12028-014-9988-5>
- [24] C. A. Schneider, W. S. Rasband, and K. W. Eliceiri, “NIH image to ImageJ: 25 years of image analysis,” *Nature Methods*, vol. 9, no. 7, pp. 671–675, Jun. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- [25] C. A. Paredes-Orta, J. D. Mendiola-Santibañez, F. Manriquez-Guerrero, and I. R. Terol-Villalobos, “Method for grain size determination in carbon steels based on the ultimate opening,” *Measurement*, vol. 133, pp. 193–207, Feb. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.068>
- [26] J. A. R. Núñez, “Sensor inteligente basado en fpga para la cuantificación

de distribuciones espaciales entre objetos,” Ph.D. dissertation, Universidad Autónoma de Querétaro, Nov. 2014.

- [27] P. J. F. White, B. W. Podaima, and M. R. Friesen, “Algorithms for smartphone and tablet image analysis for healthcare applications,” *IEEE Access*, vol. 2, pp. 831–840, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/access.2014.2348943>
- [28] J. K. S. de Souza, M. A. da Silva Pinto, P. G. Vieira, J. Baron, and C. J. Tierra-Criollo, “An open-source, FireWire camera-based, labview-controlled image acquisition system for automated, dynamic pupillometry and blink detection,” *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 112, no. 3, pp. 607–623, Dec. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.07.011>
- [29] E. A. R. Araiza, “Análisis multiescala morfológico y compensación en iluminación en imágenes digitales,” Ph.D. dissertation, Universidad Autónoma de Querétaro, May 2008.
- [30] J. Grünberger, L. Linzmayer, G. Fodor, O. Presslich, M. Praitner, and N. Loimer, “Static and dynamic pupillometry for determination of the course of gradual detoxification of opiate-addicted patients,” *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, vol. 240, no. 2, pp. 109–112, Nov. 1990. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/bf02189980>
- [31] Y. Ni and B. Sun, “A remote free-head pupillometry based on deep learning and binocular system,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 6, pp. 2362–2369, Mar. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/jsen.2018.2885355>
- [32] I. E. Loewenfeld, *The pupil: anatomy physiology and clinical applications*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

- [33] C. E. Neuert, “How effective are eye-tracking data in identifying problematic questions?” *Social Science Computer Review*, vol. 38, no. 6, pp. 793–802, Mar. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0894439319834289>
- [34] J. Kwon, K. R. Sung, S. Han, Y. J. Moon, and J. W. Shin, “Subclassification of primary angle closure using anterior segment optical coherence tomography and ultrasound biomicroscopic parameters,” *Ophthalmology*, vol. 124, no. 7, pp. 1039–1047, Jul. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2017.02.025>
- [35] A. A. of Ophthalmology, K. Boyd, and J. K. McKinney. (2020) ¿qué es el glaucoma? [Online]. Available: <https://www.aao.org/salud-ocular/enfermedades/que-es-la-glaucoma>
- [36] D. M. Olson, S. Stutzman, C. Saju, M. Wilson, W. Zhao, and V. Aiyagari, “Interrater reliability of pupillary assessments,” *Neurocritical Care*, vol. 24, no. 2, pp. 251–257, Sep. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12028-015-0182-1>
- [37] R. G. Kerr, A. M. Bacon, L. L. Baker, J. S. Gehrke, K. D. Hahn, C. L. Lillegraven, C. H. Renner, and S. K. Spilman, “Underestimation of pupil size by critical care and neurosurgical nurses,” *American Journal of Critical Care*, vol. 25, no. 3, pp. 213–219, May 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4037/ajcc2016554>
- [38] P. M. Cisarik, L. Brise, and G. Ramos, “Anisocoria assessment in subjects with dark irides – custom-built infrared screening device vs. millimeter ruler,” *Journal of Optometry*, vol. 13, no. 4, pp. 235–241, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.optom.2020.03.003>
- [39] A. A. of Ophthalmology, K. Boyd, and K. D. DeAngelis. (2020) ¿qué es la ptosis? [Online]. Available: <https://www.aao.org/salud-ocular/enfermedades/que-es-la-ptosis>

- [40] A. A. of Ophthalmology and J. T. Oatts. (2020) Intermittent exotropia. [Online]. Available: <https://www.aaopt.org/disease-review/intermittent-exotropia-2>
- [41] L. Chen, J. C. Yeung, and D. R. Anderson, “Anisocoria secondary to anticholinergic mydriasis from homeopathic pink eye relief drops,” *Clinical Medicine & Research*, vol. 15, no. 3-4, pp. 93–95, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3121/cmr.2017.1356>
- [42] J. M. Groot, N. M. Boayue, G. Csifcsák, W. Boekel, R. Huster, B. U. Forstmann, and M. Mittner, “Probing the neural signature of mind wandering with simultaneous fMRI-EEG and pupillometry,” *NeuroImage*, vol. 224, p. 117412, Jan. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117412>
- [43] A. C. Portelles, Y. Marrero-Reyes, B. Fernández-Chelala, and E. Ocampo-Trueba, “El examen de las pupilas en el neuromonitoreo clínico del paciente con trauma craneoencefálico,” vol. 29, no. 1, ago 2012. [Online]. Available: [//revista.sati.org.ar/index.php/MI/article/view/292](http://revista.sati.org.ar/index.php/MI/article/view/292)
- [44] N. Company. (2018) Neuroptics npi-200 pupillometer system. [Online]. Available: <https://neuroptics.com/npi-200-pupillometer/>
- [45] ——. (2021) Npi-300 pupillometer. [Online]. Available: <https://neuroptics.com/npi-300-pupillometer/>
- [46] N. I. for Care and H. Excellence. (2020) Npi-200 for pupillary light reflex in critical care patients. [Online]. Available: <https://www.nice.org.uk/advice/mib235/chapter/The-technology>
- [47] Brightlamp. (2022) Reflex app - plr analyzer. [Online]. Available: <https://reflexapp.io/>
- [48] Adaptica. (2022) 2win. [Online]. Available: <https://www.adaptica.com/>

- [49] U. Ophthalmic. (2022) Adaptica dr-app lyn. [Online]. Available: <https://www.adaptica.com/>
- [50] L. Chongqing Kanghua Ruiming ST Co. (2022) Aps-6000b china top quality ophthalmic equipment auto perimeter. [Online]. Available: <http://m.kanghua-dryeye.com/showroom/Aps-6000b-China-Top-Quality-Ophthalmic-Equipment-Auto-Perimeter.html>
- [51] Optiequipos. (2022) Campímetro frey ap-300. [Online]. Available: <https://www.optiequipos.com/campimetro>
- [52] A. A. of Ophthalmology, D. Porter, O. R. Chaudhary, and D. Turbert. (2021) 12 tratamientos para el ojo seco: lo que los pacientes deben saber. [Online]. Available: <https://www.aaopt.org/salud-ocular/tratamientos/topograf%C3%ADa-corneal>
- [53] Optiequipos. (2022) Topgrafo corneal sw-6000. [Online]. Available: <https://www.optiequipos.com/campimetro>
- [54] F. Medical. (2021) Frey advanced visual field analyzer. [Online]. Available: <https://www.optiequipos.com/campimetro>
- [55] P.-J. D. Temmerman, E. Verleysen, J. Lammertyn, and J. Mast, “Semi-automatic size measurement of primary particles in aggregated nanomaterials by transmission electron microscopy,” *Powder Technology*, vol. 261, pp. 191–200, Jul. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.04.040>
- [56] E. Berrezueta and T. Kovacs, “Application of optical image analysis to the assessment of pore space evolution after CO<sub>2</sub> injection in sandstones. a case study,” *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 159, pp. 679–690, Nov. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.08.039>

- [57] S. D. Vos, N. Waegeneers, E. Verleysen, K. Smeets, and J. Mast, “Physico-chemical characterisation of the fraction of silver (nano)particles in pristine food additive e174 and in e174-containing confectionery,” *Food Additives & Contaminants: Part A*, vol. 37, no. 11, pp. 1831–1846, Sep. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1809719>
- [58] J. D. Mendiola-Santibañez, “Operadores de contraste morfológicos y medida del contraste: una aplicación a la segmentación de imágenes de resonancia magnética del cerebro.” Ph.D. dissertation, Universidad Autónoma de Querétaro, Oct. 2003.
- [59] Mathworks. (2020) Segmentación y análisis de imágenes. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/images/image-analysis.html>
- [60] S. Beucher, “Numerical residues,” *Image and Vision Computing*, vol. 25, no. 4, pp. 405–415, Apr. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2006.07.020>
- [61] A. R. J. Sánchez, J. D. Mendiola-Santibañez, G. H. Ruiz, and I. Santillan, “Índice de contraste morfológico basado en el análisis de los contornos y el fondo de la imagen,” *Computacion y Sistemas*, vol. 16, pp. 99–110, 2012. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-55462012000100009](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-55462012000100009)
- [62] Mathworks. (2020) Matlab. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [63] ——. (2020) Creación de apps con interfaces gráficas de usuario en matlab. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>
- [64] A. A. of Ophthalmology, R. Mukamal, and N. Z. Gregori. (2020) ¿la luz roja protege los ojos del envejecimien-

to? [Online]. Available: <https://www.aao.org/salud-ocular/noticias/la-luz-roja-protege-los-ojos-del-envejecimiento>

- [65] A. A. of Ophthalmology, R. Mukamal, and M. A. Jackson. (2020) 12 tratamientos para el ojo seco: lo que los pacientes deben saber. [Online]. Available: <https://www.aao.org/salud-ocular/consejos/12-tratamientos-para-el-ojo-seco-lo-que-los-pacien>
- [66] Q. Zhu, S. Xiao, Z. Hua, D. Yang, M. Hu, Y.-T. Zhu, and H. Zhong, “Near infrared (NIR) light therapy of eye diseases: A review,” vol. 18, no. 1, pp. 109–119, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7150/ijms.52980>
- [67] C. V. Roger. (2019) Miosis o pupilas puntiformes: Qué es, síntomas y tratamiento. [Online]. Available: <https://areaoftalmologica.com/blog/salud-ocular/miosis/>