

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO
A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:

“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA
IDENTIFICACIÓN Y PREVENCIÓN DEL GLAUCOMA A
TRAVÉS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES
BIOMÉDICAS MEDIANTE LA RELACIÓN DE VOLUMEN DE
FIBRAS NERVIOSAS”

AUTORES:

Christian Marcelo Cajamarca Bueno

Marlon Fernando Chazi Solis

TUTOR:

Ing. Eduardo Pinos Vélez, M.Sc.

CUENCA – ECUADOR

2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Christian Marcelo Cajamarca Bueno con documento de identificación N° 0104655766 y Marlon Fernando Chazi Solis con documento de identificación N° 0105420012, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y PREVENCIÓN DEL GLAUCOMA A TRAVÉS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES BIOMÉDICAS MEDIANTE LA RELACIÓN DE VOLUMEN DE FIBRAS NERVIOSAS”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de *Ingeniero Electrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, Octubre del 2018

Christian Marcelo Cajamarca Bueno

CI: 0104655766

AUTOR

Marlon Fernando Chazi Solis

CI: 0105420012

AUTOR

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi **tutoría** fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y PREVENCIÓN DEL GLAUCOMA A TRAVÉS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES BIOMÉDICAS MEDIANTE LA RELACIÓN DE VOLUMEN DE FIBRAS NERVIOSAS”**, realizado por Christian Marcelo Cajamarca Bueno y Marlon Fernando Chazi Solis, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, Octubre del 2018



Ing. Eduardo Pinos Vélez.

CI: 0102942190

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Christian Marcelo Cajamarca Bueno con número de cédula CI. 0104655766 y Marlon Fernando Chazi Solis con número de cédula CI. 0105420012 autores del trabajo de titulación “**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y PREVENCIÓN DEL GLAUCOMA A TRAVÉS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES BIOMÉDICAS MEDIANTE LA RELACIÓN DE VOLUMEN DE FIBRAS NERVIOSAS**” certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, Octubre del 2018

Christian Marcelo Cajamarca Bueno

CI: 0104655766

AUTOR

Marlon Fernando Chazi Solis

CI: 0105420012

AUTOR

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, a mi madre y familia por brindarme su apoyo incondicional en cada momento y ser pilar fundamental durante la carrera universitaria. También expresar mi sincero agradecimiento al tutor del proyecto técnico el Ing. Eduardo Pinos, y al Ing. Vladimir Robles, por brindar guía y soporte de manera desinteresada en el desarrollo del presente trabajo.

Christian Marcelo Cajamarca Bueno

En primer lugar, quiero agradecer al Divino Niño Jesús, por permitirme cumplir una meta académica más, a mis padres y familia que fueron el apoyo incondicional en toda la carrera universitaria. Agradecer de manera sincera al Ing. Eduardo Pinos, quien fue el tutor de nuestro proyecto técnico, y de manera muy especial agradecer al Ing. Vladimir Robles, pues la ayuda que nos brindó: clases, consejos y conocimientos, fueron de suma importancia para poder culminar con éxito nuestro proyecto de titulación.

Marlon Fernando Chazi Solis

DEDICATORIAS

A mi Madre, Abuela y familiares, por brindarme su apoyo incondicional en cada momento y ser pilar fundamental para llegar a esta etapa de formación académica, siendo la motivación para seguir adelante y convertirme en un profesional, a mis amigos y compañeros, por brindar gratas experiencias a lo largo de la carrera universitaria, y a los profesores que han logrado impartir sus conocimientos valiosos para aplicarlos al beneficio de la sociedad.

Christian Marcelo Cajamarca Bueno

A mi Madre, Padre y hermanos, que son mi pilar fundamental, gracias a su apoyo incondicional pude culminar esta etapa de formación académica, ciertamente los consejos que me brindaban y las palabras de aliento, se convirtieron en la motivación necesaria para convertirme en un excelente profesional, a los compañeros que, a lo largo de la carrera universitaria, se convirtieron en amigos y cuya amistad se sigue manteniendo, gracias al lema de Don Bosco “Honrados ciudadanos y buenos cristianos”.

Marlon Fernando Chazi Solis

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIAS.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
RESUMEN.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	X
ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO.....	XI
JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES).....	XIV
OBJETIVOS.....	XV
OBJETIVO GENERAL.....	XV
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XV
GLOSARIO.....	XVI
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	1
1.1 Fisiología del Ojo Humano.....	1
1.2 Retina.....	2
1.2.1 Fotorreceptores.....	4
1.2.2 Vascularización.....	5
1.2.3 Área Macular.....	5
1.2.4 Papila Óptica.....	7
1.2.5 Nervio Óptico.....	7
1.3 Glaucoma.....	8
1.4 Tipos De Glaucoma.....	9
1.4.1 Glaucoma Tipo Primario de Ángulo Abierto (GPAA).....	10
1.4.2 Glaucoma Tipo Primario de Ángulo Cerrado (GPAC).....	12
1.4.3 Glaucoma Secundario.....	13
1.4.4 Glaucoma de Tensión Normal (GTN).....	14
1.5 Capa de las Fibras Nerviosas de la Retina (CFNR).....	14
1.5.1 Anatomía de la Capa de Fibras Nerviosas de la Retina.....	14
1.5.2 Evaluación Clínica de los Defectos de la Capa de Fibras Nerviosas de la Retina.....	15
1.5.3 Características de la Capa de Fibras Nerviosas de la Retina.....	16

1.6 Tipos de Equipos y Exámenes Empleados en la Detección y Diagnóstico del Glaucoma	17
1.6.1 Tomografía de Coherencia Óptica	17
1.6.2 Paquimetría Corneal.....	18
1.6.3 Retinografía.....	19
1.6.4 Tonometría	20
1.6.5 Optos Daytona (Escaner Digital de Retina)	21
CAPÍTULO 2: PROCESAMIENTO Y SOFTWARE DEL SISTEMA	23
2.1 Procesamiento Digital de Imágenes	23
2.1.1 Clasificación.....	23
2.2 Base de Datos de Imágenes Biomédicas	24
2.3 Técnicas Implementadas para Realizar el Procesamiento Digital de Imágenes	25
2.3.1 Operaciones Morfológicas	25
2.3.2 Métodos de Filtrado	26
2.3.3 Modelo de Color HSV	26
2.3.4 Polinomio de Interpolación de Newton	28
2.4 Software del Sistema para el Diagnóstico.....	29
2.4.1 Qt Creator.....	29
2.4.2 Qt Designer	30
2.4.3 qt Assistant.....	30
2.4.4 MinGW	31
2.4.5 OpenCV y Funcionalidades	31
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA	34
3.1 Problemática a Resolver.....	34
3.2 Etapas y Procesos del Sistema	34
3.3 Elaboración del Algoritmo que Permite Realizar el Procesamiento de Imágenes	35
3.4 Desarrollo del Método Relación de Volumen de Fibras Nerviosas para la Detección del Glaucoma	39
3.4.1 Segmentación de las Imágenes	39
3.4.2 Cálculo del Grosor de la Capa de Fibras Nerviosas de la Retina	40
3.5 Desarrollo de la Interfaz de la Herramienta del Sistema.....	41
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
4.1 Identificación de la Capa de Fibras Nerviosas	45
4.3 Resultados Obtenidos del Método Relación de Volumen de Fibras Nerviosas de la Retina.....	50

4.3 Sensibilidad y Especificidad	51
4.4 Comparación de Error entre los Métodos Existentes	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 <i>Diagrama del ojo humano</i> [13].	2
Figura 1.2 <i>Imagen fondo de ojo humano derecho</i> [13].	3
Figura 1.3 <i>Fondo de ojo y OCT macular</i> [13].	4
Figura 1.4 <i>Visualización de la cantidad de conos y bastones existentes</i> [15].	5
Figura 1.5 <i>Se observa la posición de la mácula y del nervio óptico.</i>	6
Figura 1.6 <i>Visualización interna del área macular</i> [23].	6
Figura 1.7.a <i>Nervio óptico normal.</i>	8
Figura 1.7.b <i>Nervio óptico atrofiado.</i>	8
Figura 1.8 <i>Las flechas blancas indican la presencia de glaucoma en el ojo humano.</i>	9
Figura 1.9 <i>Glaucoma de ángulo abierto</i> [33].	10
Figura 1.10.a <i>Grosor del anillo neuroretiniano normal.</i>	11
Figura 1.10.b <i>Reducción del grosor del anillo neuroretiniano.</i>	12
Figura 1.11 <i>Glaucoma de ángulo cerrado</i> [32].	13
Figura 1.12 <i>Visualización de axones que viajan hacia la papila óptica</i> [33].	15
Figura 1.13 <i>Presencia anormal del defecto focal presente en la capa de fibras nerviosa retinianas.</i>	17
Figura 1.14 <i>Examen de campo visual.</i>	18
Figura 1.15 <i>Utilización del paquímetro que permite encontrar el valor de la medida de la córnea</i> [48].	19
Figura 1.16 <i>Obtención de imágenes de fondo de ojo</i> [51].	20
Figura 1.17 <i>Tonómetro de Goldmann.</i>	21
Figura 1.18 <i>Optos Daytona.</i>	22
Figura 2.1 <i>Fases que intervienen para procesamiento de imágenes</i> [54].	24
Figura 2.2 <i>Espectro de color HSV</i> [62].	27
Figura 2.3 <i>Aproximación de la ecuación utilizando la interpolación de newton</i> [64].	28
Figura 2.4 <i>Logotipo de Qt</i> [67].	29
Figura 2.5 <i>Pantalla principal de Qt Creator para diseño de interfaz (GUI).</i>	30
Figura 2.6 <i>Menú principal de Qt Assistant.</i>	31
Figura 2.7 <i>Logotipo de OpenCV</i> [68].	31
Figura 2.8 <i>Bibliotecas disponibles en OpenCV</i> [70] [71].	32

Figura 3.1 <i>Diferentes etapas y procesos del sistema para determinar el riesgo de padecer glaucoma a partir de imágenes OCT.</i>	35
Figura 3.2 <i>Imagen original.</i>	36
Figura 3.3 <i>Conversión a modelo de color HSV.</i>	36
Figura 3.4 <i>Imagen filtrada con desenfoque gaussiano.</i>	37
Figura 3.5 <i>Imagen erosionada y dilatada.</i>	37
Figura 3.6 <i>Imagen filtrada con filtro de mediana.</i>	38
Figura 3.7 <i>Obtención de los puntos intermedios entre las dos regiones A y B: los puntos blancos representan los puntos intermedios.</i>	38
Figura 3.8 <i>Imagen aplicada el polinomio interpolación de newton en diferencias divididas: la línea roja representa la ecuación estimada.</i>	39
Figura 3.9 <i>Segmentación de la capa de fibras nerviosas de la retina.</i>	40
Figura 3.10 <i>Gráfica de las distancias para calcular el grosor de la capa de fibras nerviosas de la retina.</i>	41
Figura 3.11 <i>Diseño de la interfaz de la herramienta de soporte.</i>	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Módulos principales de la biblioteca OpenCV.	33
Tabla 4.3 Registro de los 10 pacientes con su respectivo diagnóstico médico, cedido por la Clínica "Santa Lucia" de la ciudad de Quito.	44
Tabla 4.4 Obtención y análisis automático de la capa de fibras nerviosas de la retina del ojo izquierdo de los pacientes, mediante el algoritmo desarrollado..	45
Tabla 4.5 Obtención y análisis automático de la capa de fibras nerviosas de la retina del ojo derecho de los pacientes, mediante el algoritmo desarrollado.....	47
Tabla 4.6 Valores encontrados de la identificación de glaucoma por el método propuesto aplicado en el ojo izquierdo.....	51
Tabla 4.7 Valores encontrados de la identificación de glaucoma por el método propuesto aplicado en el ojo derecho.	51
Tabla 4.8 Comparación de los valores del ojo izquierdo de los pacientes proporcionados por la clínica "Santa Lucia", con los datos adquiridos por el sistema empleado e indicando el error absoluto existente..	53
Tabla 4.9 Comparación de los valores del ojo derecho de los pacientes proporcionados por la clínica "Santa Lucia", con los datos adquiridos por el sistema empleado e indicando el error absoluto existente.	54
Tabla 4.10 Verificación del método con menor porcentaje de error.....	55
Tabla 4.1 Lista completa de los 78 pacientes que participaron en este estudio.....	65
Tabla 4.2 Comparación de los resultados del algoritmo con el diagnóstico médico .	67

RESUMEN

El glaucoma es una enfermedad que aqueja a nivel mundial, por esa razón la Organización Mundial de la Salud (OMS), estima por medio de datos estadísticos que esta patología padecen aproximadamente más de 60 millones de personas, por lo tanto las personas que sufran esta enfermedad comenzaran a perder la vista, sin conocer la razón exacta del porqué disminuye su campo visual y su agudeza visual. Por tal motivo, este proyecto presenta un nuevo enfoque de detección temprana del glaucoma, que se basa en una herramienta de soporte médico que establece como resultado un diagnóstico presuntivo del glaucoma en etapas iniciales. Para cumplir este objetivo se utiliza el equipo de Tomografía de Coherencia Óptica (OCT), donde se obtienen las imágenes de tomografía circular de la capa de fibras nerviosas del ojo humano, facilitadas por la Clínica “Santa Lucia” de la ciudad de Quito, en estas imágenes biomédicas se visualiza la zona posterior del ojo que contiene información de cada una de las capas de la retina. El diagnóstico presuntivo del glaucoma puede ser detectado a partir de estas imágenes biomédicas, debido a la disminución del grosor en una de las capas conocida como: Capa de Fibras Nerviosas Retinianas o de la Retina (CFNR).

Para este propósito se propone un algoritmo que obtenga datos cuantitativos, en el cual se realiza la segmentación de las imágenes OCT y se calcule el espesor de la CFNR, con el fin de compararlo con un grupo de pacientes de referencia y que el médico o estudiante de oftalmología distinga un ojo sano de uno enfermo, según los datos obtenidos.

Los resultados que se obtienen a partir del análisis de las imágenes biomédicas del ojo humano mediante el equipo OCT, como se indica en el proyecto son de soporte y de análisis auxiliar en el diagnóstico presuntivo del glaucoma por lo tanto no son oficiales. Para determinar con seguridad la enfermedad por parte de los médicos oftalmólogos, es necesario contar con más pruebas complementarias para determinar el correcto diagnóstico presuntivo del glaucoma.

INTRODUCCIÓN

En esta investigación, se propone una relación del grosor de la cantidad de volumen de fibras nerviosas retinianas y a su vez el poder determinar las afecciones que tienen para el diagnóstico presuntivo del glaucoma, en donde se hace una revisión bibliográfica de los temas más relevantes relacionados, obteniendo una síntesis o resumen de lo más importante y que es de interés para el proyecto de análisis y detección temprana del glaucoma, que se plantea resolver a través de procesamiento digital de imágenes biomédicas de tomografía circular. Toda esta información es empleada para el trabajo a realizar en este documento.

El glaucoma que originalmente corresponde a la pérdida de la visión o ceguera, abarca una gran posibilidad de ser detectada en su etapa temprana, al momento en que a la persona se le dificulta la visión al enfocar objetos en un entorno, que padezca de presencia de luz o exista cierta pérdida de visión, es necesario recurrir a un médico oftalmólogo, quien le brindará el tratamiento adecuado para evitar que la evolución del glaucoma siga afectando al ojo humano [1] [2] [3].

La detección del glaucoma se realiza mediante diferentes exámenes médicos, pero los más conocidos son: el examen de Tonometría por Aplanación de Goldman (TAG) que se encarga de medir la presión intraocular del ojo, otro examen es utilizar la Gonioscopia para tener una revisión del ángulo de drenaje en el ojo. Al tratarse de una enfermedad muy difícil de detectarse los costos de estos exámenes son muy elevados, por lo que es indispensable crear una herramienta de soporte que detecte y realice un diagnóstico presuntivo de manera segura y precisa, obviamente reduciendo los costos para que pueda ser accesible y aceptada por las personas que lo necesiten [4].

Se realiza un análisis de las imágenes biomédicas obtenidas de una base de datos, en la clínica “Santa Lucía” de la ciudad de Quito, con la única finalidad de lograr detectar al glaucoma en una etapa primaria o inicial, en la que el paciente tendrá la oportunidad de no sufrir una ceguera completa de su ojo afectado [3].

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

Se han realizado varios estudios en los cuales se utiliza el procesamiento digital de imágenes por computadora, para estimar y prevenir el riesgo de padecer glaucoma. Para estudios más profundos, es decir, después de haber pasado por el examen de Tonometría por Aplanación de Goldman o la Gonioscopia, se aplica otros métodos más específicos, detallados y creados para la prevención de esta enfermedad con mayor precisión y exactitud. Los más conocidos son los métodos de copa/disco, regla ISNT y desgaste de fibras nerviosas de la retina, tal como en el caso del enfoque “Un Nuevo Método para la Detección del Glaucoma Utilizando Disco Óptico y Segmentación de Copa en Imágenes Digitales del Fondo de Retina”, que presenta un diseño que aplica un método de detección automática del glaucoma utilizando imágenes de fondo de ojo, donde se calcula el área del disco óptico y así determinar un rango estándar, que al sobrepasar el valor comprendido entre ese rango de la relación copa/disco (CDR), se determina si el paciente presenta la enfermedad del glaucoma o se encuentra sano [1], el estudio “Disco Óptico Integrado y Segmentación de Copa con Aprendizaje Profundo”, realiza una implementación que se basa en una combinación de características, extraídas del método copa/disco y el método regla ISNT, por tal razón, trabaja con la región de interés del nervio óptico, en el cual procede a calcular el área del disco óptico y también efectúa una estimación del grosor del anillo neuroretiniano en la zona de la papila óptica, obteniendo valores en el área de la relación copa/disco (ACDR) y también valores de la relación copa/disco (CDR), basándose en las distancias horizontal y vertical que existen en cada ojo. Al ser un método de clasificación automática con los valores obtenidos de estos dos factores (ACDR) y (CDR), se determina si el paciente se encuentra sano o sospechoso de padecer glaucoma [3]. La metodología aplicada en “Detección Automática del Glaucoma a Partir de la Imagen de Fondo de Ojo Usando la Relación Copa a Disco y Características Híbridas”, se enfoca a un sistema autónomo de detección del glaucoma, que al analizar la imagen de fondo de ojo humano, calcula la relación de área copa/disco y la fusiona con texturas híbridas (sensibilidad, intensidad) de la imagen, permitiendo tener un sistema clasificador con una precisión del 92% [5].

Por otro lado, Rashmi Panda, Debananda Padhy, proponen la “Detección de Defectos de la Capa de Fibra Nerviosa Retiniana Basada en Redes Neuronales Recurrentes en el Glaucoma Temprano”, que es una mejora automática en la detección del defecto de la capa de fibras nerviosas de la retina (DCFNR), que aplica un método de red neuronal recurrente. Provocando que el procesamiento digital de la imagen trabaje con los píxeles, los cuales se estiman y se clasifican para convertirse en las entradas de la red neuronal recurrente, después de entrenar dicha red con los valores obtenidos, ellos calculan la amplitud angular de la DCFNR y definen el nivel de afectación que posee el paciente [6].

A través de estos estudios se ha demostrado la eficacia de estos procedimientos, aplicados a personas entre 18-65 años de edad. En la mayoría de los casos, las enfermedades del glaucoma y de cataratas, son las enfermedades que más peso tienen dentro de la pérdida de visión. Hemos enfocado nuestro análisis en la enfermedad del glaucoma, la misma que de forma significativa va deteriorando al nervio óptico, mientras aumenta la presión intraocular (PIO), llegándose a comprobar que, en los casos existentes de personas que sufren esta patología la detección no se ha ejecutado a tiempo, produciendo que el campo visual siga disminuyendo.

Como síntesis, en la mayoría de estudios elaborados sobre este tema con enfoque investigativo, se ha utilizado algoritmos que permitan conocer como está afectando el glaucoma a través del análisis imágenes biomédicas. La implementación de un nuevo método para estimar y prevenir el riesgo de padecer glaucoma será mediante la relación de volumen de fibras nerviosas retinianas, en donde, las fibras nerviosas se encuentran en mayor aglomeración en el fondo de ojo, por lo que se tendrá mayor exactitud al momento de determinar si un paciente se encuentra con principios de glaucoma. Se ha realizado otros estudios aplicando la Regla ISNT y también mediante la relación Copa/Disco, en donde solo se realiza un análisis en el nervio óptico, conociendo la relación del tamaño de la copa en comparación con el disco óptico, se comprueba si existe pérdida de tejido o si se observa una apariencia brillante, pues el aspecto que toma determina que el paciente presenta principios de glaucoma [2] [7].

El glaucoma al ser detectado en etapas iniciales mediante los métodos anteriormente explicados, ha ayudado a evitar que progrese el daño en el campo visual, por tal

motivo, se trata de dar un seguimiento al proyecto “Desarrollo de un sistema de soporte a la detección de glaucoma a través de procesamiento digital de imágenes biomédicas”. A manera que, la herramienta de soporte médico que se desarrolla, sea la continuación del proyecto antes mencionado [4] [8].

En estos últimos años, en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca se han venido desarrollando algunos proyectos de titulación enfocados a la detección y prevención temprana del glaucoma como herramientas de soporte médico, estos proyectos se han realizado en base a procesamiento digital de imágenes biomédicas del ojo humano y a el desarrollo de software y algoritmos que permiten, realizar un diagnóstico presuntivo del glaucoma [4] [8] [9].

JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)

Al conocer, que la enfermedad del glaucoma se caracteriza por ser la segunda enfermedad que causa la ceguera a nivel mundial, y que de las 60 millones de personas que lo padecen, se intuye que el 2% de personas son mayores a 50 años, así como el 3.5% corresponde a personas mayores de 70 años, también se conoce que la enfermedad del glaucoma es hereditaria y presenta mayor índice de afectación en personas con descendencia afroamericana, por tal razón es recomendable que las personas se realicen exámenes oftalmológicos periódicamente [2].

Actualmente en el Ecuador, según datos del Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades (CONADIS), existe un 49.995% de personas que presentan discapacidad visual y de este porcentaje se estima que más del 80% de personas presentan ceguera. De esta afectación visual no se posee datos exactos de cómo es deteriorada por el glaucoma, pues un daño en el nervio óptico conocido como excavación provoca el aumento en la presión intraocular del ojo (PIO), lo que los oftalmólogos describen como la causa general de disminución de la vista, por ser una enfermedad sigilosa y asintomática. Existen exámenes médicos periódicos los cuales facilitan el proceso de detección del glaucoma, pero lo que se pretende con la Ingeniería Electrónica enfocada al área de la Biomedicina, es poder identificar y prevenir esta enfermedad con mayor facilidad y brindar un tratamiento adecuado, el cual necesariamente será recetado por el médico oftalmólogo [2] [8].

La realización de este proyecto de grado es importante, debido a que se implementa un nuevo método que involucra el volumen del grosor de la capa de fibras nerviosas de la retina para detectar el glaucoma en etapas iniciales, el mismo que facilitará a los especialistas oftalmólogos, poder dar un diagnóstico al paciente del nivel de glaucoma que presenta sus ojos. Al ser una herramienta de soporte médico, permite al usuario poder obtener mayores conocimientos sobre esta enfermedad. Este proyecto, va a beneficiar a muchos doctores y estudiantes de la carrera de oftalmología o centros oftalmólogos, que no tengan el presupuesto requerido para comprar los equipos que permiten ejecutar este análisis, por tal razón, se pretende que el resultado obtenido al momento de procesar las imágenes biomédicas, demuestre un porcentaje alto de especificidad.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar una herramienta de diagnóstico presuntivo como soporte médico que permita determinar la relación de volumen de las fibras nerviosas para la detección y prevención temprana del Glaucoma.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudio y revisión de la importancia y características de las fibras nerviosas existentes en el ojo humano y su relación con el diagnóstico del glaucoma.
- Desarrollar un algoritmo basado en el método de relación de volumen de fibras nerviosas, que permita detectar y prevenir el glaucoma, mediante una base de datos de imágenes biomédicas de fondo de ojo humano, proporcionadas por la clínica Santa Lucia.
- Realizar la comparación del método relación de volumen de las fibras nerviosas con el método de Relación Copa/Disco y Regla ISNT, a modo de establecer cual método tiene mejores resultados.
- Comprobar el funcionamiento de la herramienta creada del método de la relación de volumen de fibras nerviosas aplicando en la detección del glaucoma.

GLOSARIO

CONADIS	Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades
OMS	Organización Mundial de la Salud
HTR	Examen de Tomografía Retinal
SNC	Sistema Nervio Central
OCT	Tomografía de Coherencia Óptica
PIO	Presión Intraocular
GPAA	Glaucoma Tipo Primario de Ángulo Abierto
GS	Glaucoma Secundario
GPAC	Glaucoma Tipo Primario de Ángulo Cerrado
GTN	Glaucoma de Tensión Normal
CFN	Capa de Fibras Nerviosas
CFNR	Capa de Fibra Nerviosa de la Retina
CV	Campo Visual
RCD	Relación Copa-Disco
ISNT	Inferior-Superior-Nasal-Temporal
HSV	Espectro de color: matiz, saturación y brillo o valor

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Esta primera parte consiste en una descripción de la fisiología del ojo, la función que cumple la retina, la importancia del nervio óptico, características de las capas de fibras nerviosas de la retina, además de mecanismos utilizados por los especialistas en oftalmología para la detección del glaucoma, también se aborda el tema de la enfermedad del glaucoma, los diferentes tipos o casos de glaucoma existentes y posteriormente como puede ser detectado en una etapa temprana, pues se realizó una investigación, de como las fibras nerviosas son afectadas produciendo a corto plazo la pérdida del campo visual.

1.1 FISILOGIA DEL OJO HUMANO

El ojo como un órgano del ser humano, se localiza dentro de la cavidad orbitaria, la misma se encuentra formada por los huesos frontal, esfenoides, maxilar y cigomático, palatino, lagrimal y etmoides. El globo ocular es un órgano de forma esférica que tiene una medida aproximadamente de 2.5 cm de diámetro, con tres capas de tejido que [4] son:

1. La capa externa o esclerótica: su función principal es la de proteger, además cubre cinco sextos en la superficie ocular que se prolonga a la parte anterior de la córnea [4] [10].
2. La capa media o úvea: se encuentra conformada por tres [10]partes;
 - La coroides: que es la parte más vascularizada.
 - El cuerpo ciliar: que se encuentra formado por los procesos ciliares.

- El iris: el cual se expande por la parte frontal del ojo, es un disco de color variable con un orificio central llamado pupila.
3. La capa más interna o retina: es la parte de mayor sensibilidad a la luz [10].

El ojo humano, a través de la retina, puede transformar las sensaciones luminosas que perciben los impulsos nerviosos para enviarlos al cerebro por medio del nervio óptico, en la Figura 1.1, se observa las partes que forman la estructura del ojo [11] [12]. Posteriormente en el cerebro se asocian las imágenes percibidas creando un efecto tridimensional, permitiendo de tal manera distinguir la profundidad y la distancia de la visión [11] [12].

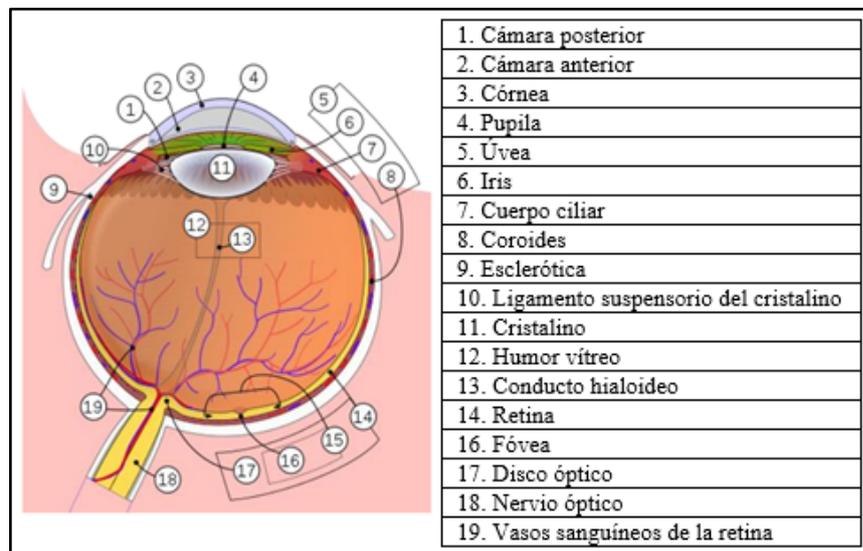


Figura 1.1 Diagrama del ojo humano [13].

1.2 RETINA

Esta es una de las partes más importantes del ojo, la retina es una capa delgada formada por múltiples capas, localizadas en la parte posterior del ojo que es la parte frontal de la capa fibrosa. Al ser una extensión del sistema nervioso central (SNC), el mismo que se encuentra conectado al cerebro a través del nervio óptico, cumple una función importante, que consiste en permitir la visualización de imágenes que son proyectadas desde la córnea y el cristalino [14] [15].

Las imágenes frecuentemente empleadas para el análisis médico de la retina y las cuales se va a utilizar en este proyecto son: las imágenes OCT, obtenidas mediante equipos descritos más adelante.

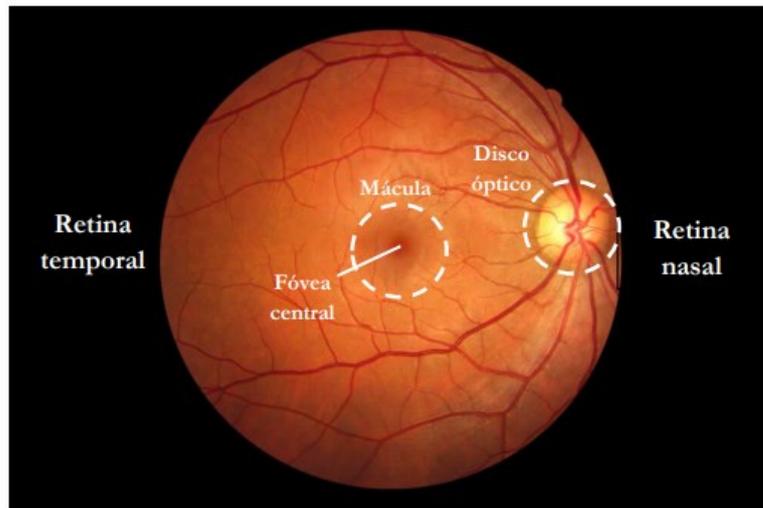


Figura 1.2 Imagen fondo de ojo humano derecho [13].

En la Figura 1.2, se observa la zona posterior de la retina del ojo humano, el médico oftalmólogo analiza el área central que corresponde a la fóvea, la mácula y la zona más clara que es el disco óptico, además de los vasos sanguíneos distribuidos por la retina. A continuación, después de haber pasado por un examen de Tonometría de Goldmann o Gonioscopia y cuyo resultado es una sospecha de glaucoma se pasa a la siguiente fase que es un examen de Tomografía por Coherencia Óptica (OCT) de la retina en donde ya no se observa las características de la imagen de fondo de ojo, si no que se observa en profundidad la composición por capas de la retina. En resumen, se podría decir que la imagen OCT se centra en una zona específica de la retina en profundidad [13][16].

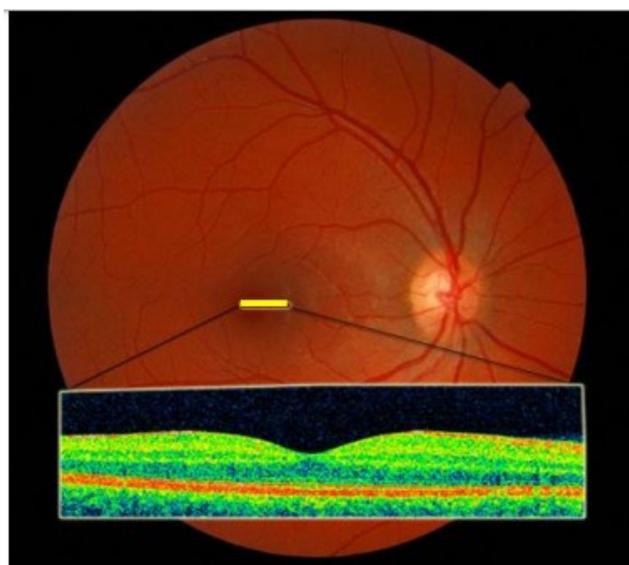


Figura 1.3 Fondo de ojo humano y su OCT macular [13].

En la Figura 1.3, se tiene la imagen de fondo de ojo humano y su respectivo OCT del que ha sido tomada, se observa la composición de las capas de la retina en profundidad, de la zona marcada de color amarillo que corresponde a la mácula.

1.2.1 FOTORRECEPTORES

Los fotorreceptores son células fotosensibles cuya finalidad, es poder recibir la luz, para que posteriormente se transforme en impulsos nerviosos, que una vez que llega al cerebro las convierte en imágenes, existe dos tipos de fotorreceptores que según su forma son: conos y bastones[14] [17].

En el interior del ojo humano exactamente en la retina se encuentran los bastones cuya forma es alargada, existiendo aproximadamente 120 millones de bastones y 6.5 millones de conos como se aprecia en la Figura 1.4 [14] [17].

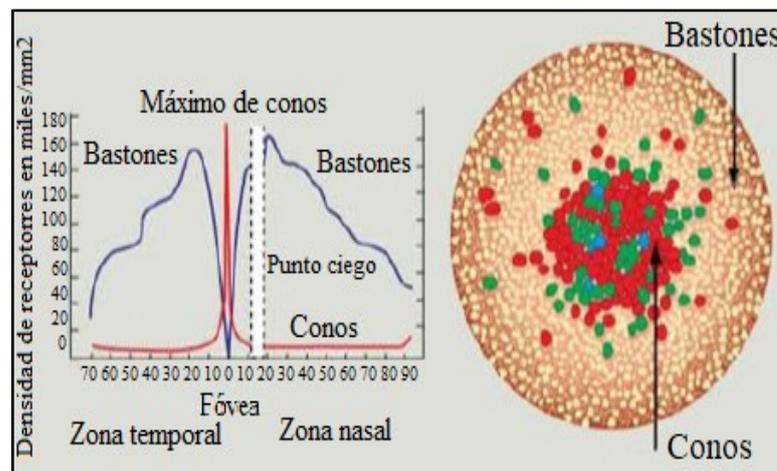


Figura 1.4 Visualización de la cantidad de conos y bastones existentes [15].

1.2.2 VASCULARIZACIÓN

En la retina se produce un proceso de oxigenación y nutrición, que se lo realiza en dos puntos diferentes. El primero, en los fotorreceptores y las células del epitelio pigmentario¹, en este proceso se nutre por propagación, es decir por medio de la membrana coriocapilar² [18] [19]. El Segundo, que hace referencia a las zonas más internas, en donde son mojadas por los vasos sanguíneos tributarias de la arteria central

¹ Epitelio pigmentado: Es una capa de células pigmentadas que aparece en el exterior de la retina que nutre sus células visuales, situados entre la retina neural y la coroides. https://es.wikipedia.org/wiki/Epitelio_pigmentario_retinal

² Membrana Coriocapilar: Es una membrana de la coroides formada por una red de capilares muy finos. http://www.esacademic.com/dic.nsf/es_medioclopedia/12944/lamina_coriocapilar

de la retina que surge por la papila óptica, lo cual permite conformar las arterias papilares inferior y superior [19] [20].

1.2.3 ÁREA MACULAR

La mácula ocular es una diminuta mancha, cuya apariencia física es fácil de distinguirla al ser de un tono de color amarillo (véase Figura 1.5), al estar ubicada en el interior de la retina ocupa la parte central, esta zona se llama fóvea³ y consta de un diámetro aproximado de 5 mm, se estima que existe una enorme concentración de conos en comparación con los bastones, se conoce como la zona de mayor agudeza visual, al ser responsable de la visión de color, pues contiene millones de células sensoriales. [21] [22].

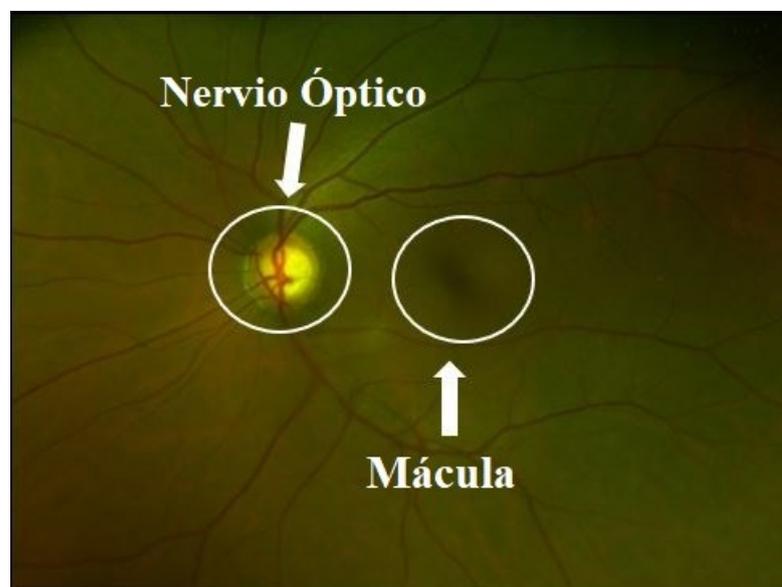


Figura 1.5 Se observa la posición de la mácula y del nervio óptico.
Fuente: Los autores

En esta área se observa susceptibilidad visual muy elevada, debido a que la fóvea se va deteriorando en la capa de células ganglionares⁴ y a su vez, en la capa de fibras nerviosas. Puesto que la mácula, tiene como misión la responsabilidad de cuidar nuestra visión central, ver los detalles que nos permiten reconocer rostros, objetos, etc. La mácula presenta un grosor de 250 μm , que es un valor cercano a la mitad de la

³Fóvea: También denominado Mácula Lútea es una mancha amarilla localizada en la retina especializada en la visión fina de los detalles, nos sirve entre otras cosas para poder leer y distinguir las caras de las personas. https://www.ecured.cu/Mácula_lútea

⁴ Células ganglionares: Son un tipo de neuronas de axón mielinizado localizadas en la superficie interna de la retina. Reciben información de los fotorreceptores mediante neuronas intermediarias bipolares. https://es.wikipedia.org/wiki/Celulas_ganglionares_de_la_retina

retina posterior, al observar la Figura 1.6, se puede distinguir las diferentes partes que conforman la mácula [21] [22].

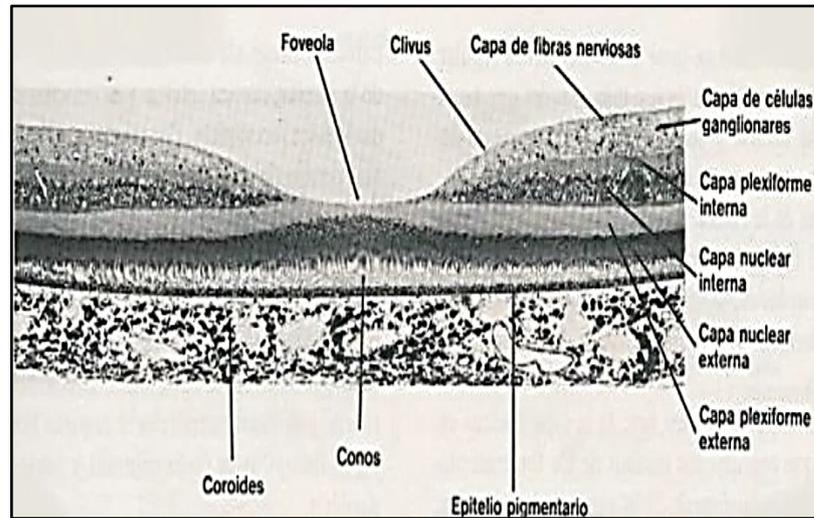


Figura 1.6 Visualización interna del área macular [23].

1.2.4 PAPILA ÓPTICA

La papila óptica o disco óptico está formado por vasos sanguíneos, células gliales, neuronas, está ubicado en el centro de la retina, consta de unas medidas de diámetro estándar de 1.5 x 2.5 mm, conformada por dos partes importantes; la primera parte es el anillo neuroretiniano, que contiene a la mayoría de fibras nerviosas, que se unen detrás del ojo para formar el nervio óptico y la segunda parte corresponde a la excavación o cúpula, que es una región en que la presencia de fibras nerviosas no existe, por lo que se indica que el paciente podría padecer glaucoma [24] [25].

1.2.5 NERVIO ÓPTICO

El nervio óptico al ser un nervio sensitivo, está constituido por fibras nerviosas de células fotosensibles que se encuentran en la retina (véase Figura 1.7.a), cuya función principal es la de transmitir la información visual que son impulsos nerviosos, hasta llegar al cerebro donde es procesada. Básicamente, 1,2 millones de axones es la cantidad por la que el nervio óptico está compuesta [18] [26].

Estos axones, provienen de la capa de células ganglionares de la retina, en la actualidad según estudios científicos el nervio óptico, es afectado por diferentes

procesos patológicos⁵ que degradan o disminuyen la visión de ojo, las más comunes son: enfermedades de la presión intraocular, cataratas y la del glaucoma [18] [26].

En la Figura 1.7.b, por el contrario, cuando existen otras afectaciones tales como: problemas vasculares, zonas inflamatorias, dolores retíneales, enfermedades hereditarias, se dice, que son patologías que no son producidas por la enfermedad del glaucoma [18] [27].

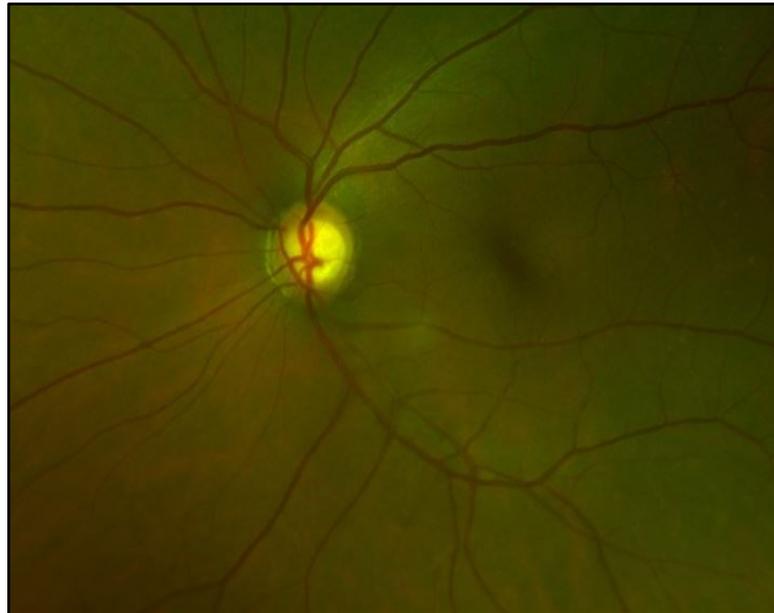


Figura 1.7.a *Nervio óptico normal.*
Fuente: *Los autores*

⁵ Patologías: hace referencia al estudio de trastornos anatómicos y fisiológicos de los tejidos y órganos enfermos, como procesos anormales producidos por causas conocidas o desconocidas. <https://www.ecured.cu/Patología>

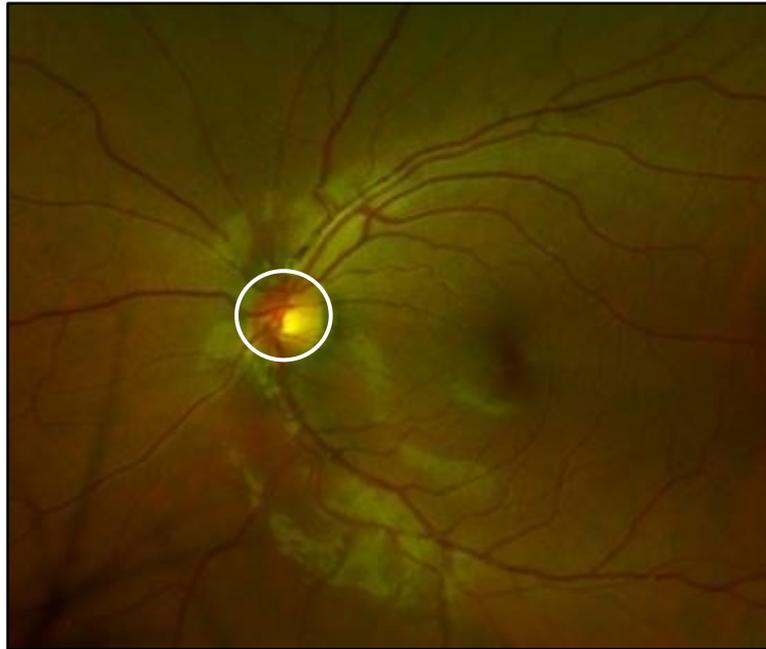


Figura 1.7.b Nervio óptico atrofiado.

Fuente: Los autores

1.3 GLAUCOMA

El glaucoma es una enfermedad que provoca daños en el nervio óptico, por medio de la presión intraocular⁶ (PIO), produciendo la pérdida de la visión, algo curioso es que escasamente se presentan síntomas. En un examen regular de los ojos, realizado por un especialista en oftalmología, la presencia de glaucoma no se la debe excluir, por la razón, de que la pérdida de visión se puede presentar de diferentes maneras, en la Figura 1.8, se muestra como el glaucoma se esparce por el ojo.

Es importante saber diferenciar el glaucoma de ángulo abierto, del glaucoma de ángulo cerrado, pues el tratamiento o la intervención de cada una varía según el diagnóstico, sin embargo para una detección temprana se puede realizar un estudio del campo visual, evaluar los datos de la presión intraocular (PIO) y finalmente verificar la morfología de la papila óptica, tomando las medidas apropiadas, que a través de un especialista se puede recetar medicamentos, recurrir a una cirugía laser, cuyo objetivo será que no exista pérdida total o exagerada de la vista [28] [29] [30].

⁶ Presión intraocular (PIO): Es la presión que ejercida por los líquidos oculares contra la pared del ojo la cual es necesaria para que este órgano se mantenga distendido. La elevación de la presión intraocular básicamente es el principal factor de riesgo para que se desarrolle la enfermedad del glaucoma. https://www.ecured.cu/Presión_intraocular

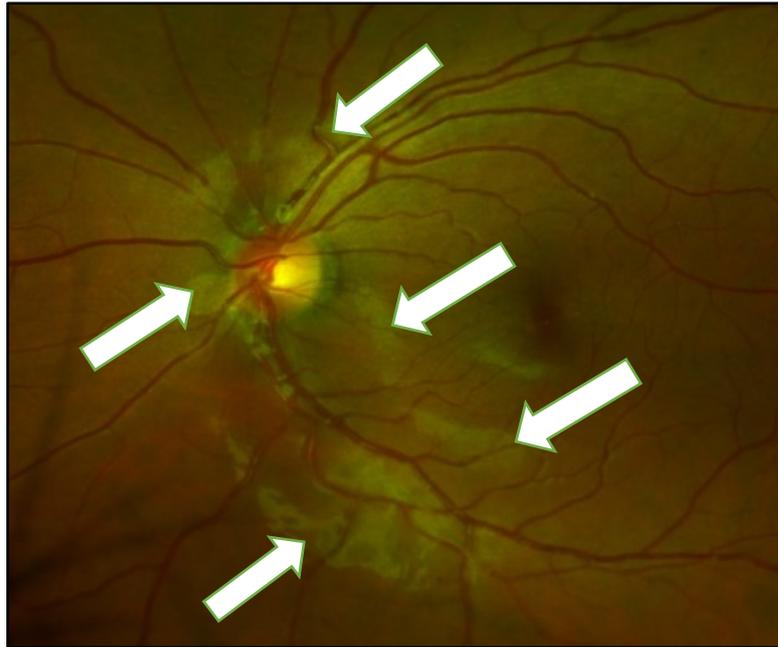


Figura 1.8 Las flechas blancas indican la presencia de glaucoma en el ojo humano.
Fuente: Los autores

1.4 TIPOS DE GLAUCOMA

Para determinar los tipos de glaucoma lo primero que se debe conocer, es que existe una alteración en el nervio óptico, presentando una hipertensión [31] ocular:

1.4.1 GLAUCOMA TIPO PRIMARIO DE ÁNGULO ABIERTO (GPAA)

Hace referencia al ángulo de drenaje del ojo, el mismo que se encuentra situado entre la córnea y el iris, cuando la presión ocular aumenta, se debe a que los canales de drenaje con el pasar del tiempo se van tapando, produciendo daños el nervio óptico, provocando la ruptura de las fibras nerviosas, después de haberse realizado el examen de glaucoma, se puede determinar que efectivamente es glaucoma de ángulo abierto, porque presenta un ángulo de drenaje de una gran amplitud, se lo puede contemplar en la Figura 1.9 [32].

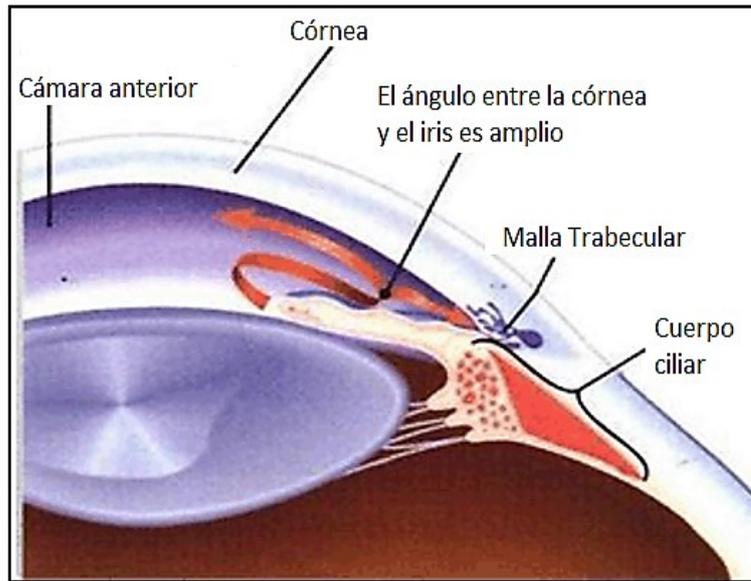


Figura 1.9 *Glaucoma de ángulo abierto* [33].

La Gonioscopia es un lente especial que se utiliza para realizar este examen. Es importante entender que cuando no se conocen las causas del glaucoma se lo denomina “Glaucoma Tipo Primario de Ángulo Abierto (GPAA)”. Por el contrario, cuando se tiene conocimiento de la disminución del fluido en el drenaje del ojo, que produce irritación, inflamación, se denomina “Glaucoma Tipo Secundario de Ángulo Abierto (GSAA)” [32] [34].

1.4.1.1 Señales de presencia de glaucoma en GPAA

Los factores de mayor relevancia [34] son:

- **Presión intraocular elevada:** la causa primordial se produce, cuando el paciente no cumple con el tratamiento asignado, lo que ocasiona que exista una complicación y que la enfermedad aumente [34].
- **Cambios progresivos del nervio óptico:** las fibras nerviosas en el nervio óptico van disminuyendo, además en la Figura 1.10.a, en comparación con la Figura 1.10.b, se determina que el anillo neuroretiniano, presenta una evidente delgadez cuando se produce hemorragias en el disco óptico [34].
- **Cambios progresivos del campo visual:** se produce cuando al paciente al momento de realizar el examen se detecta que existe una deficiencia de dilatación del campo visual, que afecta a dos factores de suma importancia como es la profundidad y el tamaño, debido al daño producido [34].

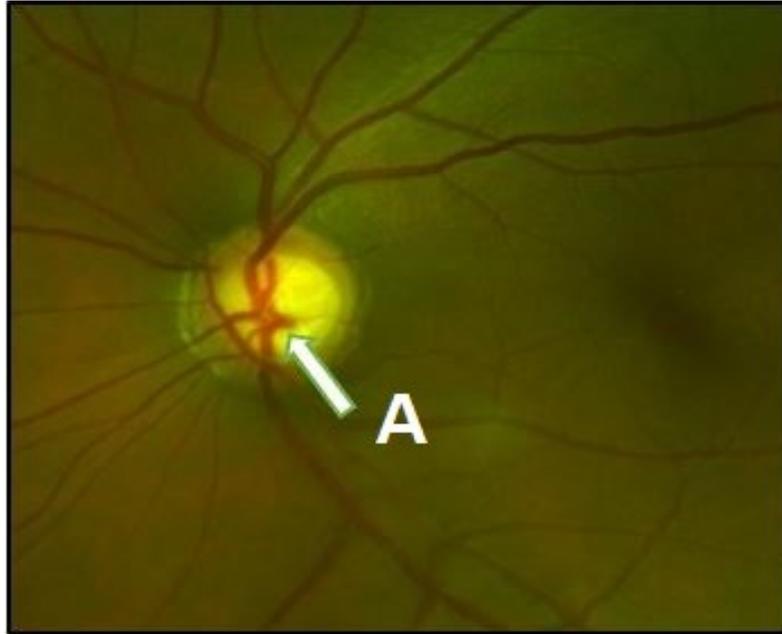


Figura 1.10.a Grosor del anillo neuroretiniano normal.

Fuente: Los autores

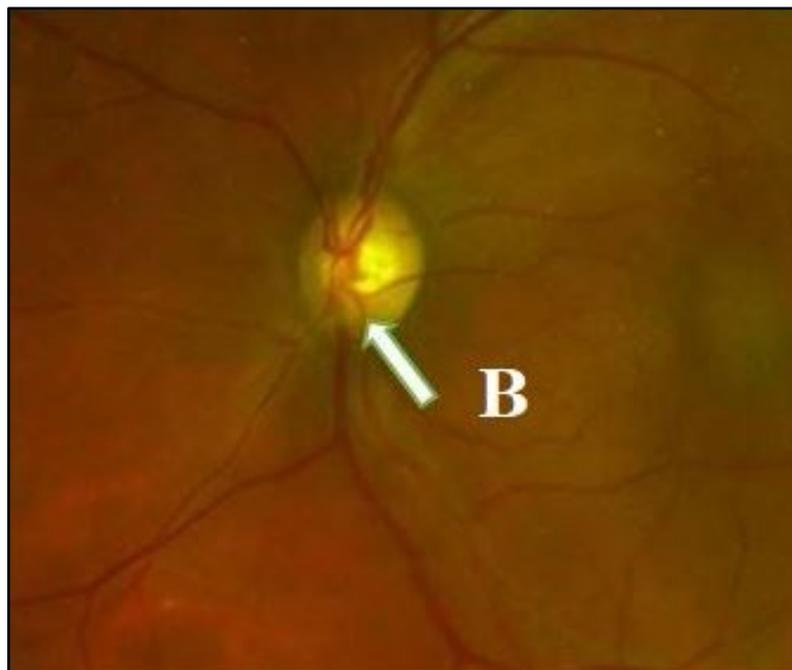


Figura 1.10.b Reducción del grosor del anillo neuroretiniano.

Fuente: Los autores

1.4.2 GLAUCOMA TIPO PRIMARIO DE ÁNGULO CERRADO (GPAC)

La característica principal en el glaucoma de ángulo cerrado radica en ser asintomático, por tal razón, se puede presentar con náuseas, dolor de cabeza y disminución parcial de la visión, este proceso puede suceder varias veces en el transcurso del día. El procedimiento que realiza el médico oftalmólogo para su

detección, se lleva a cabo mediante un lente de Gonioscopia, por lo que se realiza un cierre del ángulo, evitando un contacto entre el lente y el iris provocando un bloqueo pupilar. En la representación siguiente (ver Figura 1.11), se puede apreciar este procedimiento [32].

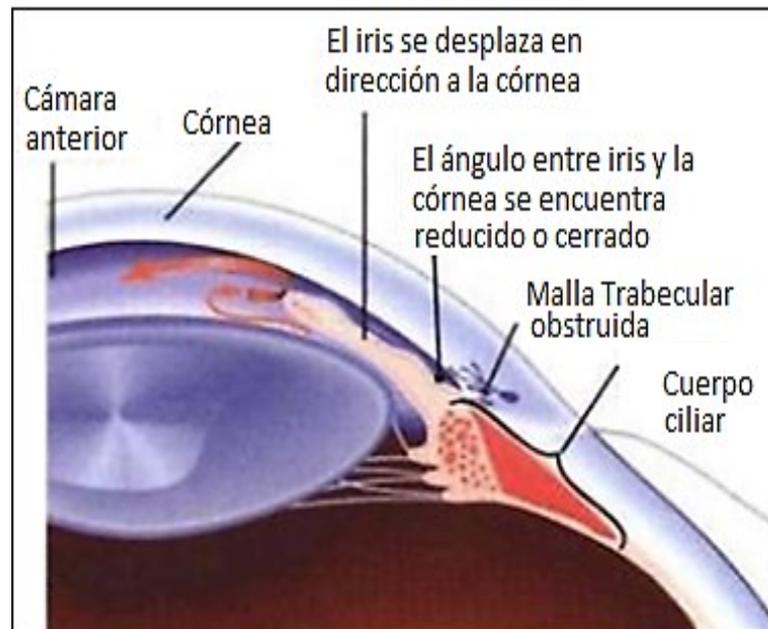


Figura 1.11 Glaucoma de ángulo cerrado [32].

1.4.1.1 Señales de presencia de glaucoma en GPAC

Los factores de mayor relevancia [26] son:

- **Aumento de la presión intraocular:** es causado por una inapropiada e inadecuada, presencia de drenaje del humo acuoso [26].
- **Cambios progresivos del nervio óptico:** engrandecimiento de carencia de la capa de fibras nerviosas, en el nervio óptico, además el anillo neuroretiniano, presenta una evidente delgadez cuando se produce hemorragias en el disco óptico [26].
- **Cambios progresivos del campo visual:** se ocasiona cuando al paciente, en el instante de efectuar el examen se descubre que existe una privación en la dilatación del campo visual, que perturba a dos factores muy importantes como es la profundidad y el tamaño, debido al daño originado [26].

1.4.3 GLAUCOMA SECUNDARIO

El glaucoma secundario es producido por la evolución de otras patologías, que son frecuentes en los pacientes, tales como: tumores intraoculares, alteraciones del cristalino, alteraciones de la retina, neurovascularización, corticoides, trauma en el globo ocular, etc. El tratamiento adecuado siempre será la identificación del factor que lo produce, pero cuando la enfermedad está muy avanzada se la debe tratar como glaucoma primario, en tal caso, la mejor opción es realizar una cirugía filtrante restableciendo el drenaje del humor acuoso⁷, en donde se nutrirá y oxigenará la estructura del globo ocular con el objetivo de regular la presión intraocular [31] [35].

1.4.4 GLAUCOMA DE TENSIÓN NORMAL (GTN)

Se produce cuando existe un daño severo en el nervio óptico y en la visión lateral en personas que tienen presión normal del ojo, superando los niveles normales de la presión del ojo entre 10-20 mm Hg. Los factores que provocan este tipo de glaucoma se deben a enfermedades del corazón, daños en el nervio óptico, aumento en la presión intraocular, siempre la cirugía va ser la mejor opción para contrarrestar esta enfermedad [36].

1.5 CAPA DE LAS FIBRAS NERVIOSAS DE LA RETINA (CFNR)

1.5.1 ANATOMÍA DE LA CAPA DE FIBRAS NERVIOSAS DE LA RETINA

La capa de fibra nerviosa de la retina (CFNR), es la más interna del fondo de ojo y está separada del vítreo por una limitante, se encuentra conformada por axones de células ganglionares no mielinizadas⁸, aproximadamente son entre 1'250.000 - 7'000.000 por cada ojo. El axón tiende a alargarse en dirección al vítreo por lo tanto llega a formar parte de la CFNR [33] [37].

Las células ganglionares retinianas o de la retina, que se originan en axones se ubican estratégicamente cerca de la papila óptica, de tal manera que el grosor de la

⁷ Humor acuoso: es un líquido transparente que se encuentra en la cámara anterior del ojo y sirve para nutrir y oxigenar las estructuras del globo ocular que no tienen aporte sanguíneo como la córnea y el cristalino. https://www.ecured.cu/Humor_acuoso

⁸ Mielina: Capa aislante que se forma alrededor de los nervios, el propósito de la vaina de mielina es permitir la transmisión rápida y eficiente de impulsos a lo largo de las neuronas. <https://www.ecured.cu/Mielina>

CFNR aumenta desde la zona inicial hasta llegar al polo posterior de la retina, siguiendo un determinado patrón que convergen en la papila óptica. Los axones (ver Figura 1.12), en la parte de la retina nasal, superior e inferior, realizan un recorrido en dirección recta para llegar a la papila óptica y el camino curvado es recorrido por los axones desde la región temporal hacia la región macular [33] [37].

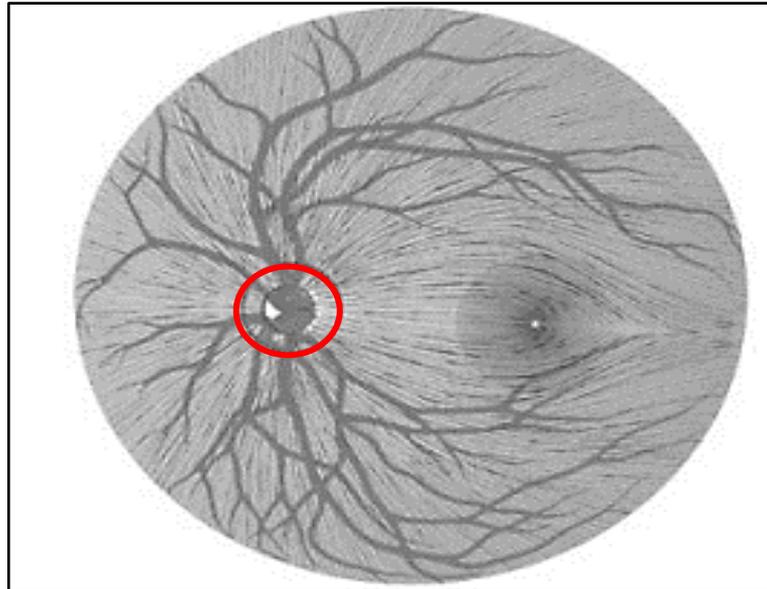


Figura 1.12 Visualización de axones que viajan hacia la papila óptica [33].

Las fibras nerviosas se encuentran presionadas o dobladas debido a que existe una variación llamativa del grosor, en la región peripapilar dentro de las CFNR. La papila óptica al encontrarse en el centro de la retina, posee un tamaño variable entre 1.6 y 2.5 mm, por falta de sensibilidad a la luz se le conoce como punto ciego [37].

1.5.2 EVALUACIÓN CLÍNICA DE LOS DEFECTOS DE LA CAPA DE FIBRAS NERVIOSAS DE LA RETINA

Los pacientes con glaucoma poseen defectos o pérdidas del campo visual que se presentan en diferentes fases de la enfermedad, esta anomalía se ve afectado a la anatomía de la retina y también a los axones de las células ganglionares en su camino hacia el nervio óptico, pues el primer defecto que sufre es un adelgazamiento de la capa de fibras nerviosas (CFN) o también llamado pérdida difusa [38] [39].

La reducción del adelgazamiento de la CFN, se produce cuando se reduce dicho patrón, es decir, el fondo del ojo presenta un aspecto oscuro porque la luz no se refleja, por lo que sería recomendable una evaluación de los vasos sanguíneos. Si al realizar

el análisis la CFN no se puede apreciar, se dice que es provocado por los siguientes [39] razones:

- El paciente padece una avanzada disminución de fibras nerviosas.
- Existe una turbiedad de medios.
- El fondo de ojo presenta poca pigmentación.
- La fotografía esta desenfocada.

1.5.3 CARACTERISTICAS DE LA CAPA DE FIBRAS NERVIOSAS DE LA RETINA

En el disco óptico en los polos inferior y superior la presencia de CFNR, se encuentra más evidente y voluminoso, según datos estándares en personas saludables las medidas del grosor medio de la CFNR, es aproximadamente $128.4 \pm 15.4 \mu\text{m}$, en el caso de que la persona tenga principios de glaucoma el valor del grosor decrece a $102.0 \pm 25.4 \mu\text{m}$, en su defecto si la persona ya presenta la enfermedad de glaucoma este valor desciende a $86.5 \pm 31.5 \mu\text{m}$. [40] [41].

Cerca del 20% de los pacientes que presentan glaucoma, los haces de fibras nerviosas que tienen un aspecto a estriaciones plateadas, con la edad se vuelven menos visible, por lo que el cristalino también pierde claridad. En la neuropatía óptica isquémica⁹ existe deficiencia en la CFNR ya que la disminución de la misma, puede ser de forma difusa o focal en ambos casos la perdida de la visión es inevitable [33] [40].

En la Figura 1.13, la presencia de estos defectos focales, es divisada en forma de bandas sombrías que se amplían hacia la periferia. Los especialistas en oftalmología indican que estos defectos son provocados por variación de la función visual cuando existe perdidas mayores al 50% del grosor de la CFNR [33] [40] [41].

⁹ Neuropatía óptica isquémica: Se denomina así al infarto isquémico de la porción anterior del nervio óptico, que en su fase aguda lo observamos como edema de la papila y que se manifiesta como una pérdida gradual de la visión.

https://www.ecured.cu/Neuropatía_óptica_isquémica

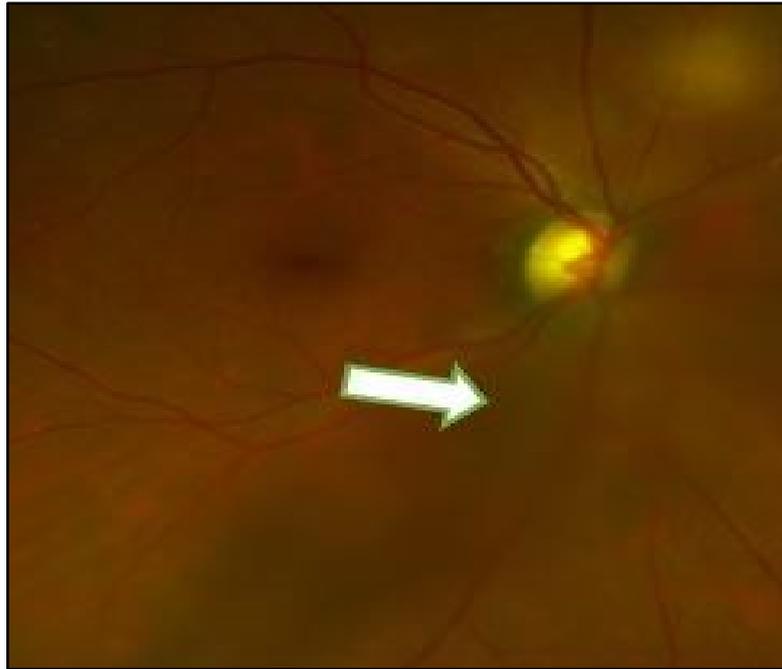


Figura 1.13 Presencia anormal del defecto focal presente en la capa de fibras nerviosas retinianas.
Fuente: Los autores

Se considera defectos fisiológicos cuando las deformaciones de la CFNR son más estrechos que los vasos retinianos, sigue existiendo daño, por lo tanto, estos defectos focales cambian y se tornan más oscuros y anchos, al presentar una reducción borrosa de la visibilidad de la CFNR la detección de los defectos focales, no tiene gran impacto. La edad del paciente dificulta gravemente poder diferenciar si el adelgazamiento de la CFNR, ocurre en verdad o es producido por una pérdida fisiológica [33] [40] [41].

1.6 TIPOS DE EQUIPOS Y EXAMENES EMPLEADOS EN LA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL GLAUCOMA

Los especialistas en enfermedades oculares utilizan varios instrumentos, para valorar y dar un resultado a sus pacientes, por lo cual se estudiará los mecanismos usados en la oftalmología para la detección del glaucoma.

1.6.1 TOMOGRAFÍA DE COHERENCIA ÓPTICA

La tomografía de coherencia óptica es una tecnología relativamente nueva, consiste en una técnica de imagen tomográfica basada en interferometría de baja coherencia. Cuya finalidad se basa en obtener imágenes de alta resolución (alrededor de $15\mu\text{m}$), lo cual es 10 veces mayor que el ultrasonido coronario, en tejidos biológicos de forma no invasiva. Su funcionamiento consiste en iluminar con una fuente de luz el

tejido y poder medir en esa muestra el eco óptico, pues la luz llenará por completo la muestra y de esa forma se obtendrá información de la misma [42] [43].

En la Figura 1.14, al emplear una técnica no invasiva el OCT, elabora imágenes de muy alta resolución de la CFNR, mediante un haz de luz en el tejido, teniendo claro que en etapas tempranas del glaucoma, se podrán realizar un seguimiento de la CFNR circumpapilar, de los cambios ocasionados en el nervio óptico [44] [45].



Figura 1.14 Examen de campo visual.

Fuente: Los autores

1.6.2 PAQUIMETRÍA CORNEAL

Es una prueba que consiste en medir el grosor de la córnea, que dependiendo de los resultados obtenidos se brindará el tratamiento adecuado. En el caso de que el paciente presente glaucoma, la presión ocular será una variable que dependerá del espesor corneal, puesto que una córnea delgada a comparación de una córnea gruesa, su grosor es muy variado [46] [47].

Para realizar este examen se coloca un paquímetro (ver Figura 1.15), esta herramienta puede estar instalada en equipos más sofisticados y complejos tales como los tomógrafos, al ser un método moderno permite al oftalmólogo obtener y observar, la córnea del paciente en un entorno de 3D, teniendo una mayor posibilidad de entender y comprender, alguna irregularidad para dar un diagnóstico al paciente [46] [47].



Figura 1.15 Utilización del paquímetro que permite encontrar el valor de la medida de la córnea [48].

1.6.3 RETINOGRAFÍA

La Figura 1.16, muestra el examen de retinografía, uno de los procedimientos más utilizados para la detección del glaucoma, consiste en una prueba que dilatando la pupila se obtiene una imagen de fondo de ojo. Una retina saludable indica que se tiene una buena visión, pues la retina es el tejido que cubre el interior del ojo [49] [50].

El especialista oftalmólogo en unos 20 minutos antes de comenzar dicho examen, introducirá en ambos ojos del paciente unas gotas de tropicamida en ambos ojos. La función de estas gotas es poder dilatar las pupilas, de tal manera que la visión del fondo de ojo a través del retinógrafo sea un proceso fácil de realizar. Al momento de obtener estas imágenes se las puede comparar con imágenes anteriores del paciente, en la que la veracidad de la prueba de la retinografía hará una detección temprana y precoz de enfermedades de fondo de ojo y lo que es más relativo e importante, es que permitirá hacer un seguimiento de cómo evolucionarán estas enfermedades [49] [51] .



Figura 1.16 Obtención de imágenes de fondo de ojo [51].

1.6.4 TONOMETRÍA

Este método se emplea para medir la presión intraocular (PIO), empleando un tonómetro, al tener unos valores altos de la presión intraocular: del humo acuoso, del humo vítreo. Esto quiere decir que el oftalmólogo, podrá detectar si el glaucoma está presente en el paciente [20] [23] [25].

Debido a que en la córnea se produce evidentes deformaciones, se emplea diferentes tipos de tonometría para su identificación tales como: Tonómetro de rebote, Tonómetro de Aplicación de Goldmann (TAG), Tonopen XL, Tonometría de no contacto o neumática [28] [29].

El tonómetro de no contacto o neumática consiste en emitir una cantidad mínima de aire con dirección a la córnea para aplanarla, el objetivo de emplear el aire es que mientras más plana sea la córnea, más precisa será el valor de la presión intraocular [28] [29].

El tonómetro de Aplanación de Goldmann (véase Figura 1.17), se reconoce como el método de mejor exactitud, por tal razón, es el método que más se emplea para la detección del glaucoma. El funcionamiento es muy simple pues consiste en una lámpara de hendidura la misma que al ser colocada en el tonómetro, se la acerca al

paciente hasta tocarlo con la punta la córnea, en este procedo se mide la fuerza que emplea el tonómetro para realizar la aplanación de la córnea, dicha fuerza obtenida corresponde al valor de la presión intraocular. [8] [27].



Figura 1.17 Tonómetro de Goldmann.
Fuente: Los autores

1.6.5 OPTOS DAYTONA (ESCANER DIGITAL DE RETINA)

Optos Daytona (véase Figura 1.18), dentro de la industria es el primer instrumento optometrista que realiza un escaneo de la retina con la implementación de rayos láser dobles (láser verde y rojo), cuya finalidad es poder ingresar a los ojos del paciente, a través de la pupila hasta 2 mm y estando ya en la retina, procede a tomar imágenes de alta calidad cuya eficiencia permitirá que el médico oftalmólogo, pueda dar su diagnóstico minutos después [52].

Optos es una máquina que está revolucionando en la oftalmología, puesto que esta herramienta tiene como función, realizar un escaneo completo de la retina, es decir, tiene como objetivo revelar de forma inmediata cualquier problema de salud oftalmológico [52].

Una ventaja innovadora es que brinda la posibilidad de detectar las anomalías de la retina de manera rápida y eficiente, lo que genera que los pacientes reciban tratamiento rápido por cualquier problema de salud en su campo visual.



Figura 1.18 *Optos Daytona.*
Fuente: *Los autores*

CAPÍTULO 2: PROCESAMIENTO Y SOFTWARE DEL SISTEMA

En este capítulo se detallará cómo será el procesamiento digital de las imágenes biomédicas obtenidas, también se explicará cuáles fueron los métodos, operaciones morfológicas y técnicas utilizadas para la creación del algoritmo que permita detectar el glaucoma en los pacientes. Finalmente se indicará características del software libre a utilizar.

2.1 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El sistema visual humano es el mecanismo de procesamiento más completo que existe, nos permite detectar, analizar y almacenar imágenes, sin duda la visión es el segundo sentido más empleado por la especie humana. Este proceso, está dentro de una de las áreas de ingeniería que estudia la manipulación y análisis de elementos contenidos en una imagen digital mediante un procesador. Definida como la agrupación de técnicas empleadas con el fin de mejorar su calidad, en el cual un sistema de análisis tiene un parámetro de entrada una imagen, y el resultado es otra imagen ya procesada. Esta disciplina ha sido de gran importancia en áreas como la medicina, telecomunicaciones, control de procesos industriales y entrenamiento [53] [54].

2.1.1 CLASIFICACIÓN

Se puede definir como procesos de adquisición, representación y explicación de la información, a partir de un mundo tridimensional se logra obtener estas imágenes

y para una mayor facilidad en su utilización se observa en la Figura 2.1, como está dividido estos procesos.

- Adquisición.
- Preprocesado.
- Segmentación.
- Representación y descripción.
- Reconocimiento e interpretación.

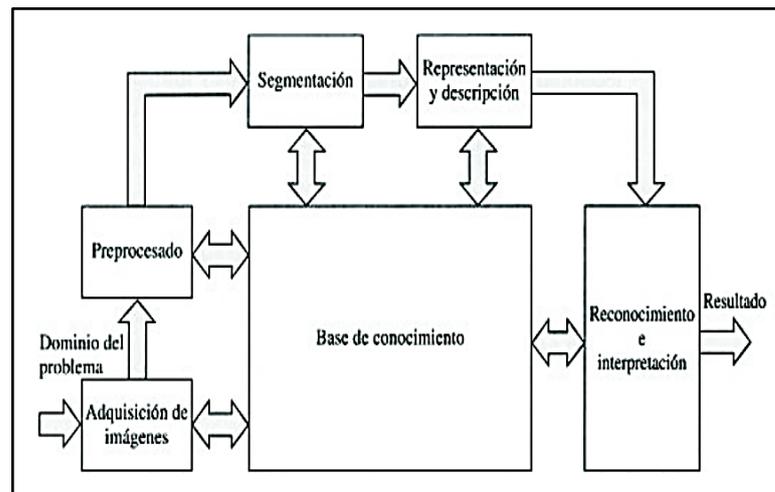


Figura 2.1 Fases que intervienen para el procesamiento de imágenes [54].

La primera parte es la adquisición del proceso en el cual se obtiene la imagen, en el preprocesado se produce la disminución de ruido y realce de detalles, la parte de segmentación es un proceso en el cual se divide la imagen en regiones de nuestro interés. Mediante procesos de descripción se obtienen características para diferenciarlas de otras, el reconocimiento es el proceso de identificación de objetos. Finalmente, la interpretación a un conjunto de objetos conocidos, le brinda un significado [54].

2.2 BASE DE DATOS DE IMÁGENES BIOMÉDICAS

Una vez finalizada la revisión bibliográfica del glaucoma, de sus características, así como los métodos de análisis, diagnóstico y equipos involucrados, se procedió a la obtención de las imágenes OCT, que fueron proporcionadas por la clínica “Santa Lucia” de la ciudad de Quito, de un total de 117 pacientes. Al adquirir estas imágenes se procedió a realizar una validación manual, en la que se definió que

78 imágenes son válidas para realizar este análisis ya que el resto de imágenes eran muy opacas o muy claras en la región de interés.

2.3 TÉCNICAS IMPLEMENTADAS PARA REALIZAR EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

En este punto se da a conocer las técnicas necesarias para poder realizar el procesamiento digital de dichas imágenes, puesto que se utiliza la base de datos proporcionada por la clínica "Santa Lucia". El objetivo principal es explorar el nervio óptico y así poder detectar las fibras nerviosas para el análisis y aplicar las diferentes técnicas de filtrado, operaciones morfológicas, transformaciones de color HSV, así como segmentación de las imágenes.

2.3.1 OPERACIONES MORFOLÓGICAS

2.3.1.1 Erosión

Esta operación se caracteriza porque permite restar o eliminar los elementos externos dentro de la imagen empleada, dado que esos elementos son cubiertos por una escala gris, es decir, solo se considera los pixeles¹⁰negros, normalmente se obtiene una reducción de la imagen original [55] [56] [57].

2.3.1.2 Dilatación

Esta operación morfológica es empleada como una intervención de suavizado en el procesamiento de imágenes, se enfoca más en un crecimiento de pixeles, en otras palabras, para la parte del fondo de la imagen el en cual el pixel, que forma parte de esa región tomará el máximo nivel de la escala de gris, de acuerdo a la apariencia y valores del elemento, se eliminan o suavizan los fragmentos oscuros produciendo de tal manera, que se modifique su estructura lo cual produce un agrandamiento de la imagen [55] [56] [57].

¹⁰ Pixel Es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital, ya sea una fotografía, un fotograma de video o un gráfico. <https://www.ecured.cu/Pixel>

2.3.2 MÉTODOS DE FILTRADO

2.3.2.1 Filtro de Suavizado Gaussiano

El filtro de Gauss o Gaussiano es considerablemente utilizado en la edición de imágenes digitales, pues es un filtro de suavizado (ver ecuación 2.1), el mismo que tiene como función reducir el ruido, al momento de realizar el análisis de imágenes digitales, al utilizar la matriz de Gauss y trabajar con la matriz de la imagen se obtiene una convolución bidimensional, al ser una convolución bidimensional, se la puede trabajar la primera convolución en sentido vertical y la segunda convolución en sentido horizontal [58] [59].

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.1)$$

Este filtro gaussiano es empleado en difuminar los bordes, para eliminar el ruido de las imágenes empleadas, o sea, utiliza la función gaussiana. Al actuar sobre cada pixel y obteniendo un promedio entre los valores de todos los pixeles se produce la eliminación de ruido lo cual provoca que la imagen sea opaca o menos nítida [58] [59].

2.3.2.2 Filtro Mediana

Este filtro se emplea en cuando el valor final de un pixel no es un promedio, al contrario, es el valor real que se encuentra en la imagen cuyo objetivo es reducir, el efecto opaco o borroso se hace presente en la imagen. La dificultad de aplicar este filtro radica en calcular el valor central de los pixeles, para posteriormente aplicar la ecuación 2.2. En donde: $f(x)$ = resultado del calcular el valor del pixel, K = número de muestras, y_{med} = media de un conjunto de muestras [60] [61].

$$f(x) = y_{med} = \{f(x - K), \dots, f(x - 1), f(x), f(x + 1), \dots, f(x + K)\} \quad (2.2)$$

2.3.3 MODELO DE COLOR HSV

Un modelo de color, hace referencia a que mediante la utilización de colores primarios y al mezclarlos entre ellos se obtengan otros colores, este proceso se puede seguir realizando, hasta que en un momento dado se logre cubrir el espectro visible en toda su totalidad. Se propuso utilizar el modelo de color HSV (estas siglas que en

ingles representan: Matiz, Saturación y Brillo o Valor), con el objetivo de preparar las imágenes biomédicas para el proceso de segmentación.

El modelo de color HSV (véase Figura 2.2), se describe como la transformación no lineal del modelo RGB, tiene forma de un cilindro con dimensiones unitarias en diámetro y altura, este modelo de color se basa en coordenadas cilíndricas, en otros términos, es una representación tridimensional del color, que se basa en matiz, saturación y brillo [62].

- Matiz (H): representa el valor comprendido del ángulo que se forma al oscilar entre 0° y 360° grados [62].
- Saturación (S): corresponde a la cantidad de luz blanca agregada, es decir, si se tiene una mayor cantidad de luz blanca, menor saturación tendrá el color. Los niveles a los que trabaja se establecen entre 0 y 1, el valor de 0 indica que no existe saturación mientras que el valor de 1 determina que la saturación se encuentra en toda su intensidad [62].
- Brillo (V): es la intensidad de luz absorbida por el observador [62], viene dado entre 0 y 1 pues estos parámetros corresponden a negro es 0 y blanco es 1, además puede variar en porcentajes establecidos entre 0% y 100%

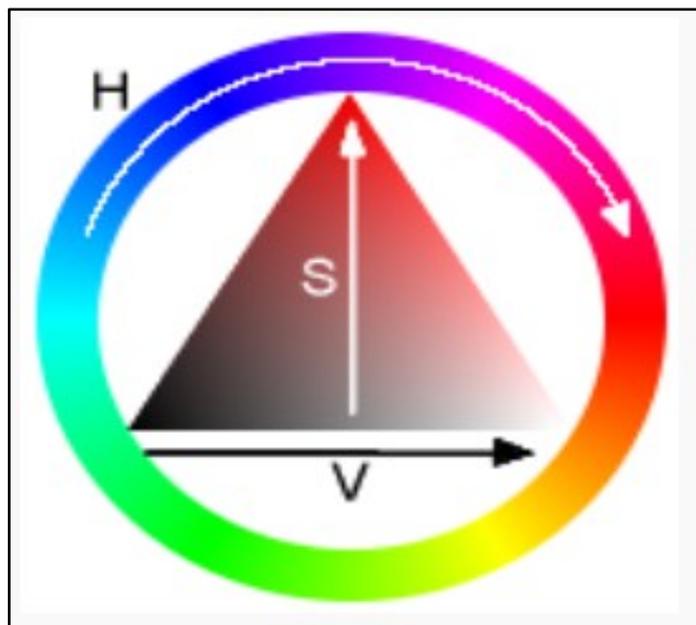


Figura 2.2 Espectro de color HSV [62].

2.3.4 POLINOMIO DE INTERPOLACIÓN DE NEWTON

2.3.4.1 Polinomio interpolación de newton en diferencias divididas

Se implementa el polinomio interpolación de newton en diferencias divididas debido a que los factores que tenemos: puntos del polinomio, no conocer la función del polinomio, satisfacen con las características de las ecuaciones que emplea este método, y de esta manera llegar a encontrar la ecuación del polinomio. Con el propósito de poder estimar una ecuación y segmentar la capa de fibras nerviosas de la retina.

Una serie de puntos en un polinomio se interpolan en este procedimiento, pues intenta adaptar el polinomio de grado n -ésimo a uno de forma $(n+1)$, como se observa en la ecuación 2.3. Se establece que al cumplir con $k = 0$, hasta $k = n$, y al cumplir las restricciones $P_n(x_i) = y_i$, y conociendo que la iteración comienza desde $i = 0$, hasta $i = n$, se puede estimar los valores de b_k (ver ecuación 2.3) [63].

$$P_n(x) = b_0 + b_1(x - x_0) + b_2(x - x_0)(x - x_1) \dots \\ + b_n(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1}) \quad (2.3)$$

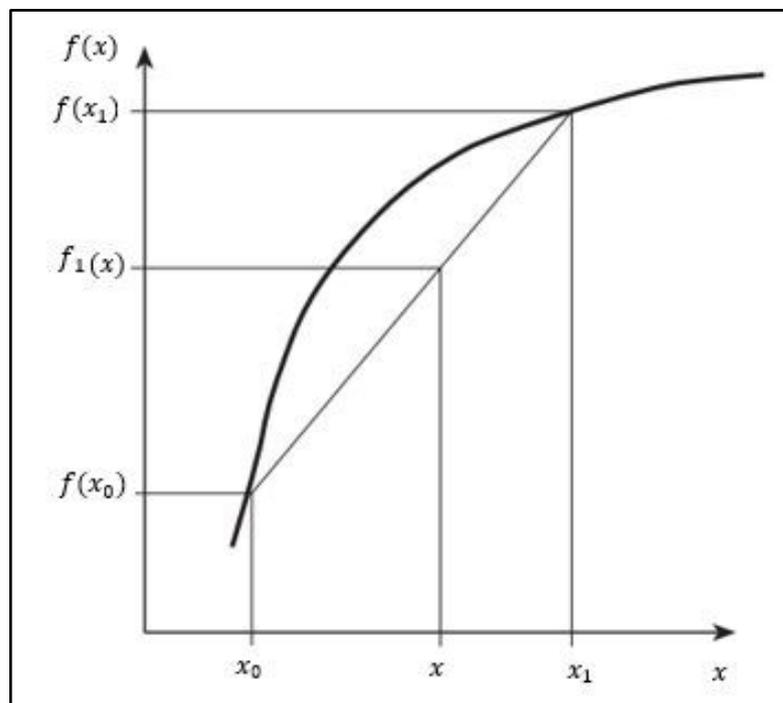


Figura 2.3 Aproximación de la ecuación utilizando la interpolación de newton [64].

Fórmulas para calcular los valores de $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$:

$$b_0 = f(x_0) \quad (2.4)$$

$$b_1 = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (2.5)$$

$$b_2 = \frac{\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} - \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}}{x_2 - x_1} \quad (2.6)$$

2.4 SOFTWARE DEL SISTEMA PARA EL DIAGNÓSTICO

Para el respectivo análisis e interfaz para el diagnóstico del glaucoma, se hace uso de la plataforma de software libre Qt que es una tecnología, que nos brinda variedad de herramientas y elementos gráficos en diferentes aplicaciones como: aplicaciones de escritorio y sistemas electrónicos. Para el análisis de las imágenes de fondo de ojo se utiliza OpenCV, que es un conjunto de librerías, OpenSource que funciona en grupo con Qt, que se utiliza para el procesamiento de imágenes y la visión artificial en general. Para el procesamiento de las imágenes biomédicas de fondo de ojo se hace una revisión bibliográfica de los distintos métodos, técnicas de filtrado y operaciones morfológicas para el análisis de las imágenes [65] [66].

2.4.1 QT CREATOR



Figura 2.4 Logotipo de Qt [67].

Qt Creator (véase Figura 2.4), es un entorno de desarrollo (IDE) que utiliza el lenguaje de programación C++, para la creación de aplicaciones que hacen del entorno

de programación Qt, que se utiliza en aplicaciones con interfaces de usuario en varias plataformas (Microsoft Windows, Linux, Mac OS X), dispone de herramientas de soporte como Qt Designer, Qt Assistant, MinGW [67].

2.4.2 QT DESIGNER

Es una herramienta para diseño y desarrollo de interfaces (GUI). En la Figura 2.5, se observa que, mediante este instrumento se puede modificar cualquier elemento como botones, widgets, ítems, contenedores para creación de la interfaz [66].

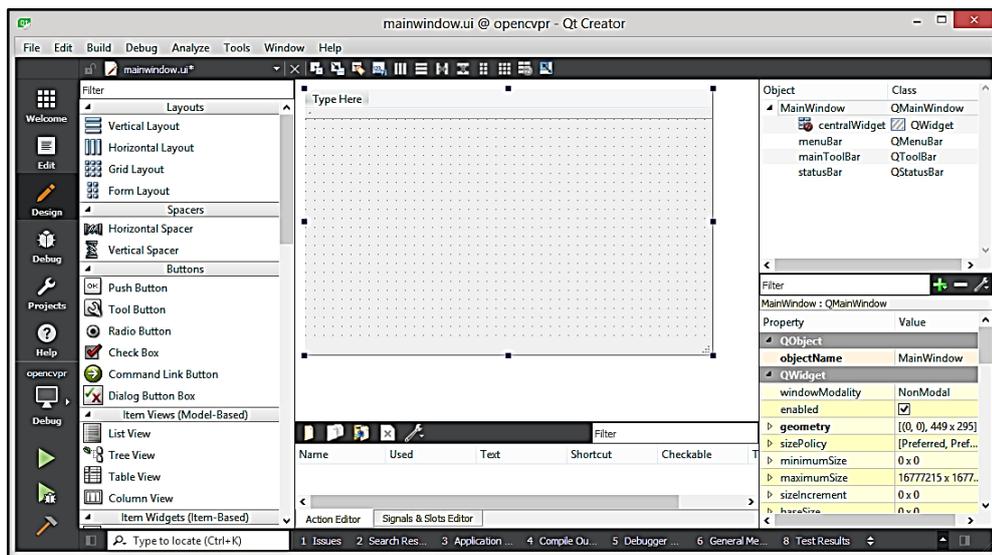


Figura 2.5 Pantalla principal de Qt Creator para diseño de interfaz (GUI).

Fuente: Los autores

2.4.3 QT ASSISTANT

Esta herramienta nos sirve como ayuda y búsqueda de documentación oficial de Qt en páginas HTML, observar Figura 2.6 [66].

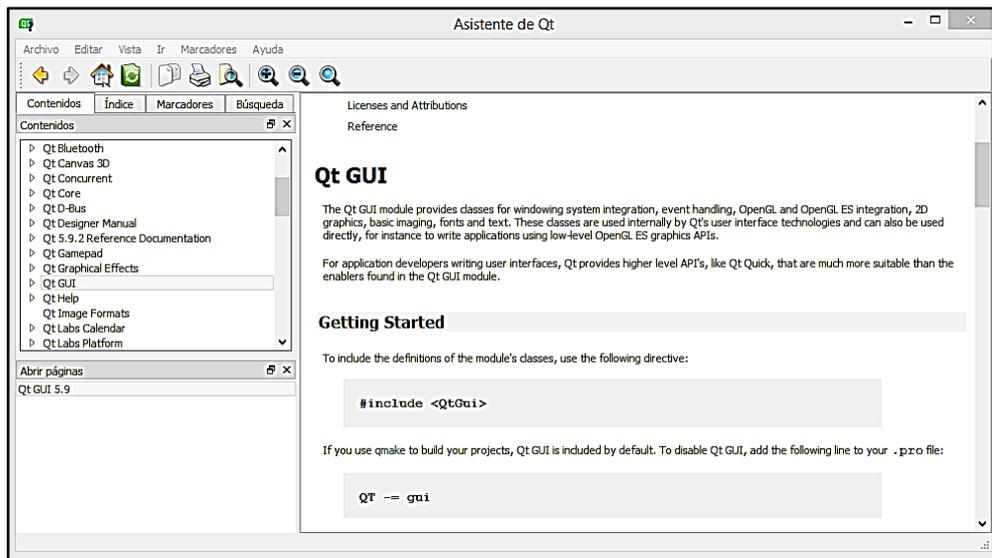


Figura 2.6 Menú principal de *Qt Assistant*.
Fuente: Los autores

2.4.4 MINGW

MinGW es una implementación del compilador Gcc para la plataforma Windows, que permite el desarrollo de aplicaciones nativas para esta plataforma y que se puede generar tanto ejecutables como librerías API de Windows [65].

2.4.5 OPENCV Y FUNCIONALIDADES

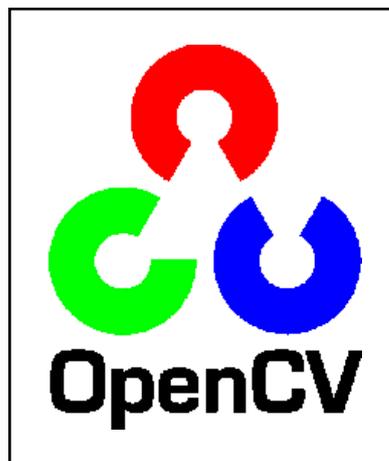


Figura 2.7 Logotipo de *OpenCV* [68].

OpenCV (ver Logotipo Figura 2.7), es una librería (Open Source Computer Vision Library: <http://opencv.org>), para el tratamiento de imágenes, utilizada principalmente para aplicaciones de visión por computadora en tiempo real para diferentes sistemas operativos como Windows, Linux, Mac OS X [69]. Desde el año 1999 se creó y ha sido una herramienta de referencia por la comunidad de

investigadores en Computer Visión. Originalmente desarrollado por Intel liderado por Gary Bradski como iniciativa de investigación de algoritmos de visión artificial. Después de una serie de lanzamientos beta, la versión 1.0.0 se lanzó en octubre de 2006. A ella le siguieron la 2.0.0 en octubre de 2009 y la 2.1.0 en abril del 2010. A partir de entonces se lanzaron a mayor frecuencia hasta llegar a la versión actual 3.3.1 lanzado en octubre del 2017 [67].

OpenCV fue diseñado brindando un código eficiente y con enfoque a aplicaciones en tiempo real. Los objetivos de OpenCV es proporcionar herramientas de visión artificial de fácil uso que ayude a las personas a desarrollar aplicaciones sofisticadas, dispone de varios paquetes de alto nivel para desarrollo de aplicaciones de visión por computadora, se agrupan en librerías C/C++ y herramientas scripting tanto para usuario avanzados como usuarios de nivel medio [69] [70]. Permite realizar recortes de imagen, mejorarlas modificando brillo, nitidez y contraste, segmentar imágenes, detectar formas, contornos, detección de objetos en movimiento en tiempo real, reconocimiento de objetos conocidos, estimación movimiento de un robot y uso de cámaras estéreo para obtener visión 3D del mundo, por nombrar algunas de sus aplicaciones [70].

OpenCV tiene una estructura modular, lo que significa que el paquete incluye varias bibliotecas compartidas o estáticas, como se aprecia en la Figura 2.8. Los siguientes módulos están disponibles [70] [71]:

```
LIBS += C:\opencv\build\bin\libopencv_core331.dll
LIBS += C:\opencv\build\bin\libopencv_highgui331.dll
LIBS += C:\opencv\build\bin\libopencv_imgcodecs331.dll
LIBS += C:\opencv\build\bin\libopencv_imgproc331.dll
LIBS += C:\opencv\build\bin\libopencv_features2d331.dll
LIBS += C:\opencv\build\bin\libopencv_calib3d331.dll
```

Figura 2.8 Bibliotecas disponibles en OpenCV [70] [71].

En la Tabla 2.1, se puede divisar los módulos más utilizados o empleados, que posee las bibliotecas del OpenCV.

Tabla 2.1 Módulos principales de la biblioteca OpenCV.

FUNCIONALIDADES DEL MÓDULO	
Core	Estructura de datos, tipos de datos, y gestión de la memoria.
Highgui	Interfaz gráfica de usuario. Leer y escribir video e imágenes.
Imgproc	Filtrado de imágenes, transformaciones geométricas de imágenes, estructura y análisis de la forma.
Video	Análisis de movimiento, seguimiento de objetos en tiempo real.
Calid3d	Calibración de la cámara y reconstrucción 3D desde múltiples puntos de vista.
Features2d	Detectores de características sobresalientes, descripción, y juego.
Objdetect	Detección de objetos utilizando cascada y clasificadores de histograma de gradiente.
MI	Modelos basados en estadística y clasificación de algoritmos para aplicaciones de visión artificial.
GPU	Paralización de algoritmos seleccionados para una rápida ejecución.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA

En el presente capítulo se detalla el cómo se desarrolló el algoritmo del método “Relación de volumen de fibras nerviosas” o también conocido como “Relación del grosor del volumen de fibras nerviosas de la retina”, en el software libre Qt Creator, el mismo que nos permita efectuar un diagnóstico presuntivo sobre el paciente, determinando si padece de glaucoma o se encuentra en etapas iniciales.

3.1 PROBLEMÁTICA A RESOLVER

Se tiene como objetivo desarrollar un algoritmo que permita detectar en etapas tempranas la enfermedad del glaucoma, como solución se pretende implementar el método de relación de volumen de fibras nerviosas mediante el cual, aplicando el procesamiento de imágenes, operaciones morfológicas, filtros y otros métodos que son explicados dentro de la implementación de esta herramienta de soporte médico, se pueda dar una respuesta satisfactoria al problema planteado.

3.2 ETAPAS Y PROCESOS DEL SISTEMA

Se puede observar en la Figura 3.1, cada una de las etapas y procesos que el algoritmo ejecuta para el procesamiento de estas imágenes biomédicas, que nos permite eliminar factores que distorsionan la imagen, logrando así limpiar o aclarar las imágenes para posteriormente poder hallar el valor del grosor de las fibras nerviosas de la retina, que es el parámetro más importante para poder manifestar un correcto diagnóstico presuntivo.

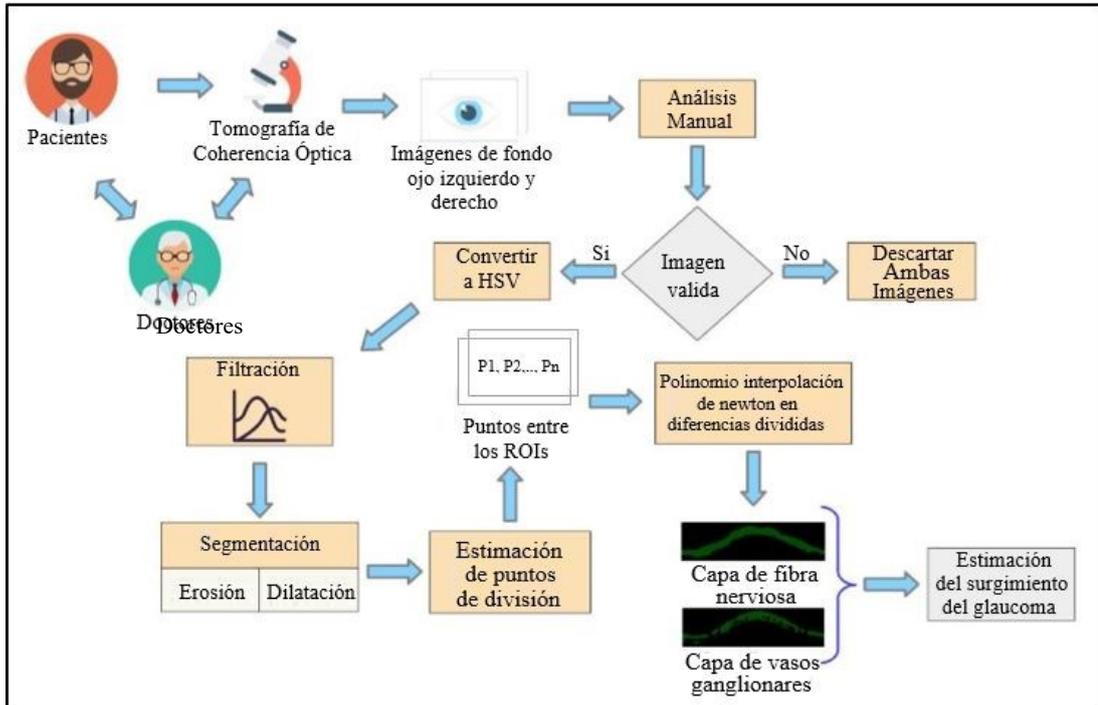


Figura 3.1 Diferentes etapas y procesos del sistema para determinar el riesgo de padecer glaucoma a partir de imágenes OCT.

Fuente: Los autores

3.3 ELABORACIÓN DEL ALGORITMO QUE PERMITE REALIZAR EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

La implementación del algoritmo empieza una vez concluido el proceso de validación manual de las imágenes biomédicas, a continuación, se realiza una identificación de las dos capas que conforman la imagen (ver Figura 3.2), ya que está conformada por: la de capas de fibra nerviosas de la retina y otra capa de células ganglionares. Posteriormente (véase Figura 3.3), se realiza una conversión a modelo de color HSV, para obtener una mejor resolución de la imagen, variando los parámetros de la imagen con la finalidad de pretender aislar y segmentar la región de interés.

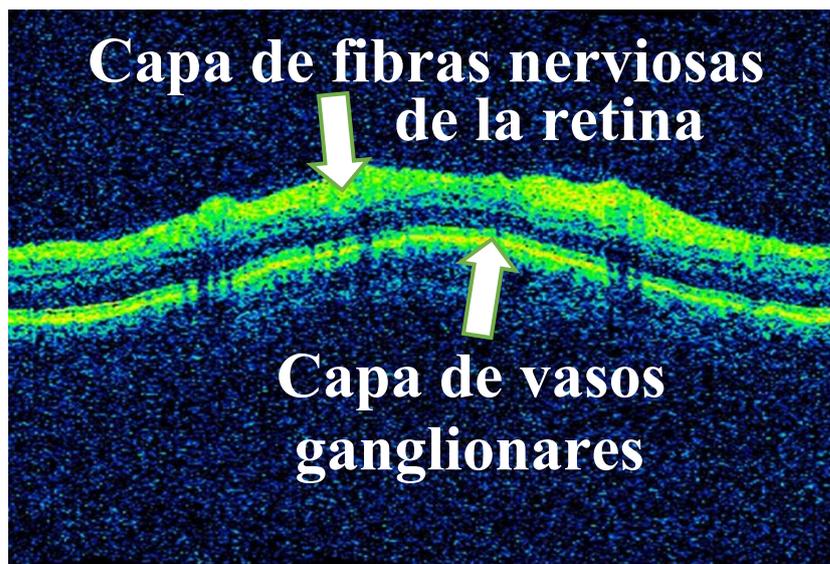


Figura 3.2 *Imagen Original.*
Fuente: *Los autores*

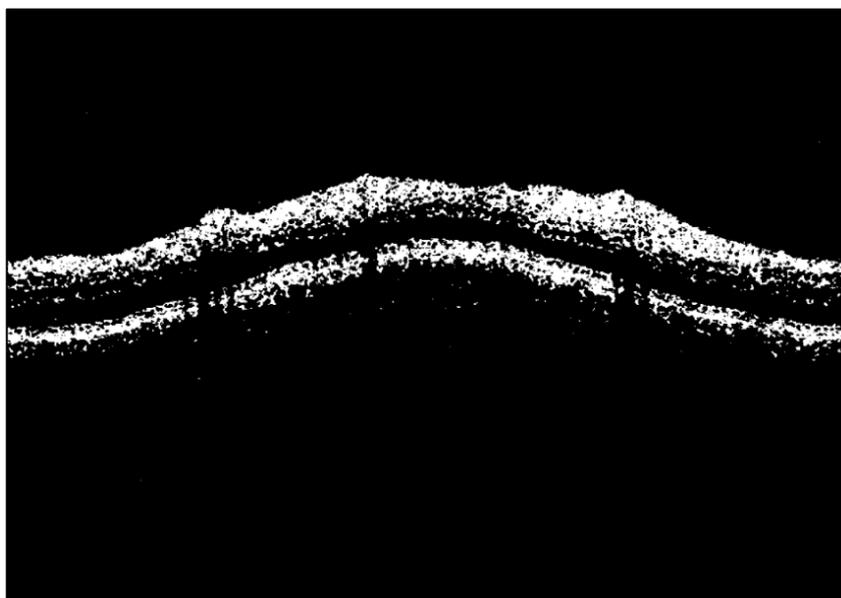


Figura 3.3 *Conversión a modelo de color HSV.*
Fuente: *Los autores*

Para disminuir el ruido que presenta la imagen de la Figura 3.3, se aplicó el filtro de suavizado gaussiano, obteniendo de tal manera, una imagen filtrada mostrada en la Figura 3.4, después se procedió a realizar la erosión y dilatación como se observa en la Figura 3.5, para poder definir y aclarar de mejor manera la zona de interés.



Figura 3.4 *Imagen filtrada con desenfoque gaussiano.*
Fuente: *Los autores*



Figura 3.5 *Imagen erosionada y dilatada.*
Fuente: *Los autores*

Como se puede notar en la Figura 3.5, existe todavía la presencia de ruido, por tal motivo, se utilizó el filtro de mediana en el cual, primero se tomó la media de los pixeles vecinos permitiendo eliminar el ruido o efectos que no sean de la imagen para la aplicación de este filtro, obteniendo un mayor suavizado de la imagen biomédica que esta siendo procesada, pues al eliminar estas imperfecciones, el suavizado presentará una mejor resolución de los pixeles de la imagen (ver Figura 3.6).

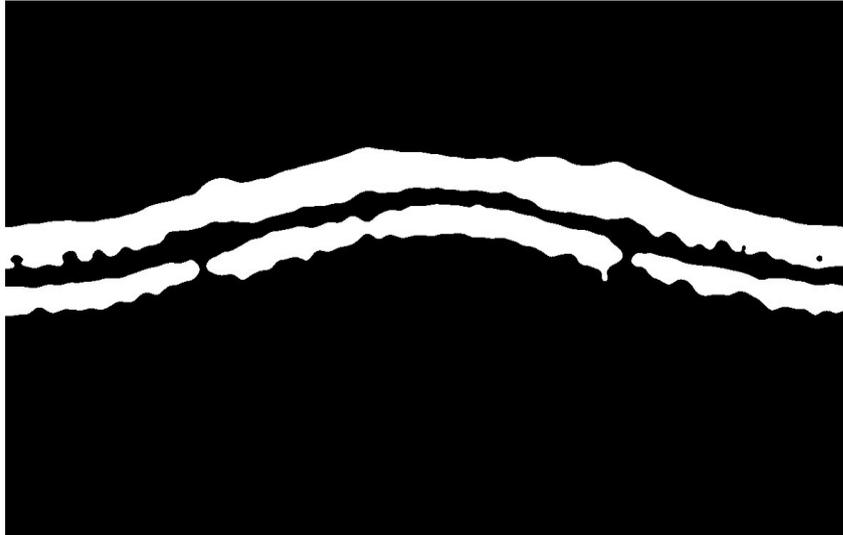


Figura 3.6 *Imagen filtrada con filtro de mediana.*
Fuente: Los autores

Con la aplicación de estos filtros se obtiene una imagen, donde se observa la correcta segmentación de las regiones como se visualiza en la Figura 3.7, pues ahora se recortará la región superior correspondiente a la capa de fibras nerviosas de la retina que es de nuestro interés, mediante función *findVpoint()*, la cual hace un recorrido de la imagen de filas y columnas, entre las regiones A y B. Se encuentran y se grafican los puntos entre estas regiones, en donde la región A corresponde a la capa de fibras nerviosas de la retina y la región B es la capa de células ganglionares.

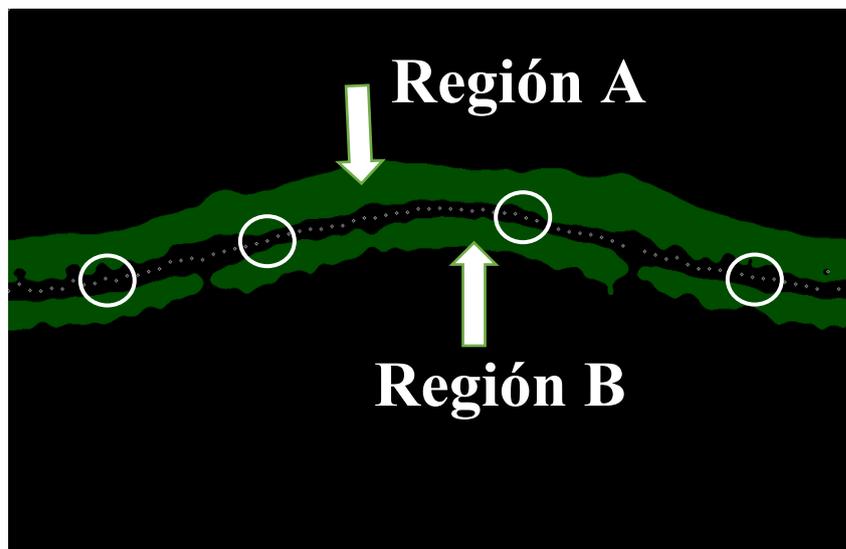


Figura 3.7 *Obtención de los puntos intermedios entre las dos regiones A y B: los puntos blancos representan los puntos intermedios.*
Fuente: Los autores

3.4 DESARROLLO DEL MÉTODO RELACIÓN DE VOLUMEN DE FIBRAS NERVIOSAS PARA LA DETECCIÓN DEL GLAUCOMA

3.4.1 SEGMENTACIÓN DE LAS IMÁGENES

En la Figura 3.7, el proceso de graficar los puntos es para poder segmentar y analizar solo la región A que es de nuestro interés, por tal razón, 78 puntos fueron los que graficaron y se distinguen en la mitad de la imagen biomédica procesada. Pues, posteriormente se aplicó el polinomio de interpolación de newton en diferencias divididas, con el propósito de poder encontrar una ecuación que se aproxime a todos los puntos (véase Figura 3.8).

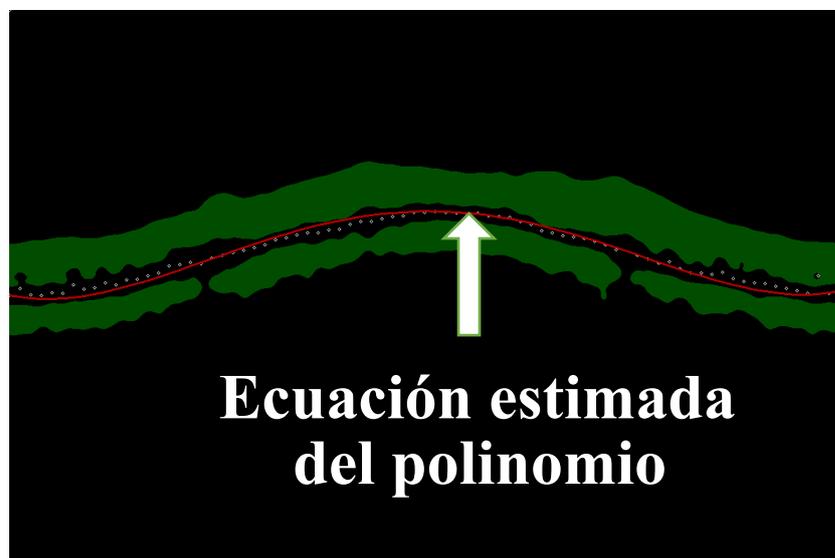


Figura 3.8 Imagen aplicada el polinomio interpolación de newton en diferencias divididas: la línea roja representa la ecuación estimada.

Fuente: Los autores

Después de haber encontrado la ecuación del polinomio, realizamos una segmentación de la imagen con la ecuación estimada, con el fin de separar la región A de la región B, para continuar con el análisis de la imagen biomédica procesada (ver Figura 3.9), y lograr examinar la región de interés obtenida.



Figura 3.9 Segmentación de la capa de fibras nerviosas de la retina.
Fuente: Los autores

3.4.2 CÁLCULO DEL GROSOR DE LA CAPA DE FIBRAS NERVIOSAS DE LA RETINA

Para el cálculo del grosor de las fibras nerviosas de la retina (véase Figura 3.10), primero se realizó la identificación de 23 puntos en la región A, es decir, 23 puntos en la parte superior y 23 puntos en la parte inferior, con el fin, de encontrar la distancia entre estos puntos, logrando obtener 23 distancias. Posteriormente, se realizó un promedio de las distancias obtenidas, con la finalidad de determinar el tamaño del grosor existente en la capa de fibra nerviosa de la retina de cada paciente y compararlos con el diagnóstico médico, otorgado por la clínica “Santa Lucia” de la ciudad de Quito, en los que se indica si los pacientes estén sanos, presentan glaucoma o el glaucoma se encuentra en etapas iniciales (Sospecha).

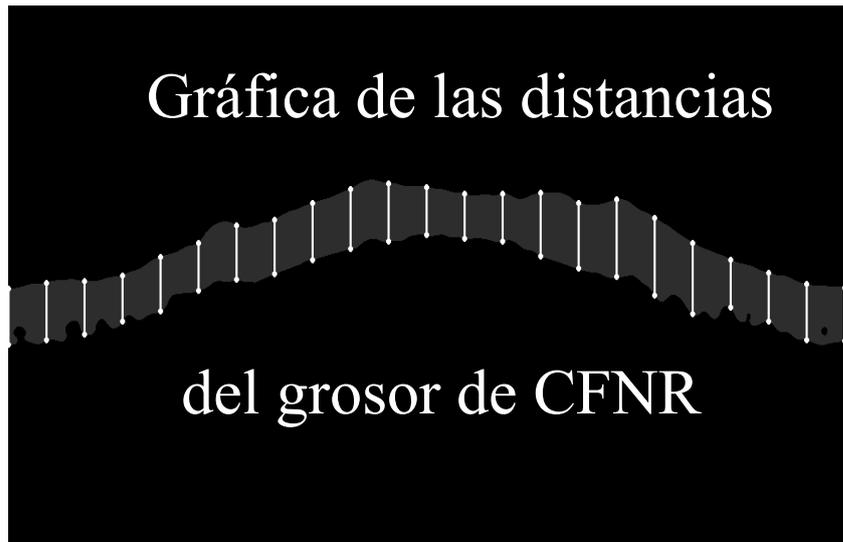


Figura 3.10 *Gráfica de las distancias para calcular el grosor de la capa de fibras nerviosas de la retina.*

Fuente: *Los autores*

3.5 DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE LA HERRAMIENTA DEL SISTEMA

Una vez realizado el esquema general del algoritmo con sus funciones, que se desarrolla mediante QtDesigner, que es una herramienta de QtCreator, que proporciona el diseño de interfaces de usuario (GUI), al generar ventanas, botones, cajas de texto, etiquetas, listas, etc.

A continuación, se describe cada uno de los elementos presentes en la interfaz:

- **Botón Abrir:** Al pulsar este botón se escoge del directorio la imagen a procesar y se visualiza la imagen.
- **Botón Procesar:** Este botón al presionarlo, visualiza las imágenes procesadas con el valor del grosor y el diagnóstico presuntivo para el paciente.
- **Botón Imprimir:** La función de este botón es generar un archivo PDF con las imágenes y los datos de análisis del paciente.
- **Botón Nuevo:** Limpia los datos cargados para un nuevo uso del programa.
- **Botón Salir:** Cierra el programa y termina el análisis.

Se llegó a trabajar con unos rangos ya establecidos por las imágenes biomédicas obtenidas por el equipo OCT de la clínica “Santa Lucía”, en donde se clasifican los rangos de la enfermedad del glaucoma de la siguiente manera: para el ojo izquierdo paciente con glaucoma entre (37 - 68 μm), paciente con sospecha entre (>68 - 75 μm) y paciente sano entre (76 - 109 μm), en cambio para el ojo derecho paciente con glaucoma entre (52 - 65 μm), paciente con sospecha entre (67 - 74 μm) y paciente sano entre (>74 - 109 μm), para posteriormente ofrecer un diagnóstico presuntivo.

En la Figura 3.11, se puede observar la interfaz de la herramienta de soporte médico desarrollada, en la que se expresan los resultados de la imagen biomédica de los ojos de un paciente, en el cual se indica como diagnóstico presuntivo que el paciente padece glaucoma en su ojo derecho y tiene sospecha de glaucoma en su ojo izquierdo.

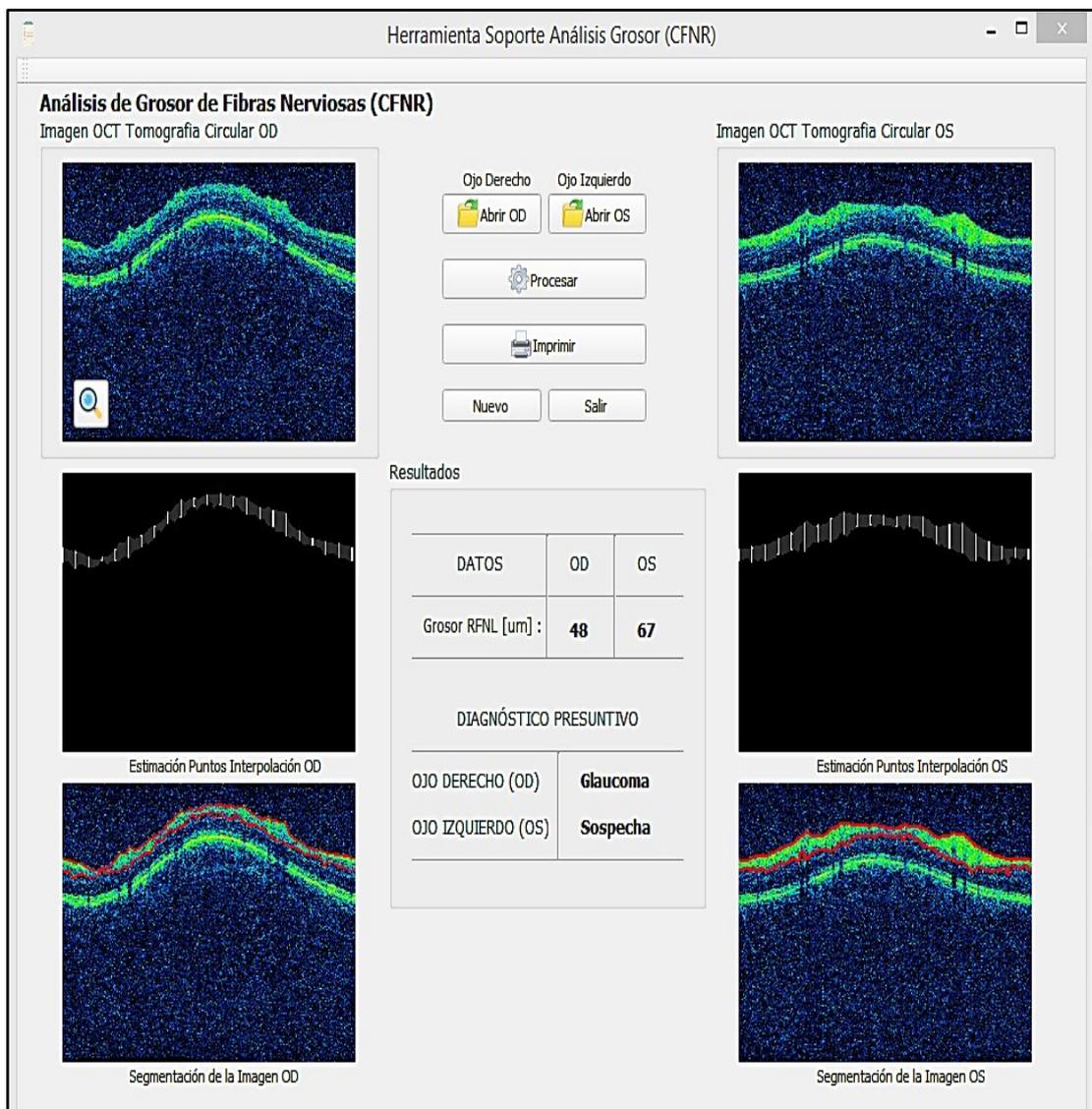


Figura 3.11 Diseño de la interfaz de la herramienta de soporte.
Fuente: Los autores

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describe los resultados obtenidos con el algoritmo implementado en cada ojo, es decir, en el ojo izquierdo (OS) y en el ojo derecho (OD). Al realizar este análisis en los pacientes se comprobó la sensibilidad y la especificidad del sistema. También se detalla la comparación del error, entre el método de relación de volumen de fibras nerviosas con los dos métodos propuestos por un estudio anterior (Relación Copa/Disco y Regla ISNT), determinando cual es el método de menor error.

En el Anexo 1 se puede observar la Tabla 4.1 y la Tabla 4.2, en la cual la Tabla 4.1 contiene la información completa de todos los pacientes que intervinieron en este estudio, por respeto al diagnóstico médico y la privacidad de estas personas no se especifica el nombre de cada persona.

En la Tabla 4.2 del Anexo 1, se divisa la comparación de los resultados obtenidos de todos los pacientes al utilizar la herramienta de soporte medico elaborada. En la Tabla 4.3, se visualiza la lista de los 10 pacientes que fueron escogidos al azar de la Tabla 4.1 del Anexo 1, a manera que se pueda explicar cómo fue el procesamiento digital de las imágenes biomédicas y también explicar cómo se realizó la comparación del error absoluto del método propuesto con los otros dos métodos anteriormente mencionados.

Cabe recalcar que para el cálculo de la sensibilidad y de la especificidad con la implementación del método relación del grosor del volumen de fibras nerviosas de la retina, se lo efectúo con el número total de participantes, es decir con los 78 pacientes.

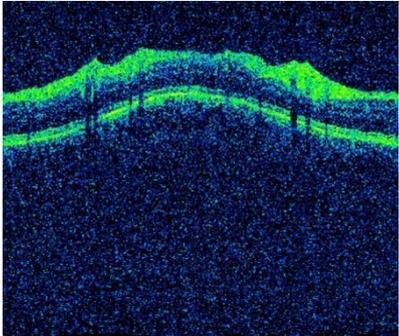
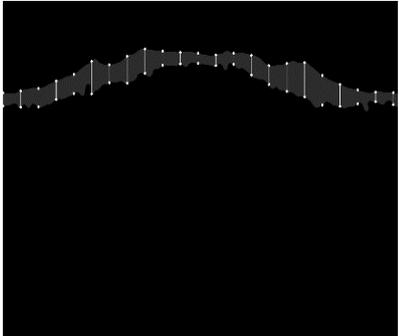
Tabla 4.3 Registro de los 10 pacientes con su respectivo diagnóstico médico, cedido por la clínica "Santa Lucía" de la ciudad de Quito.

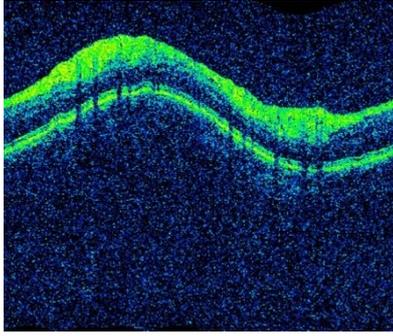
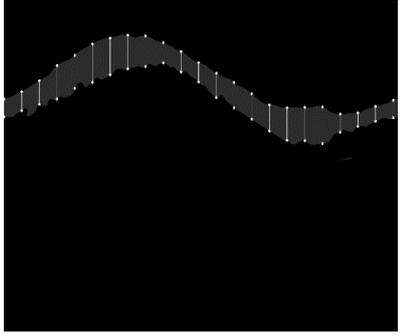
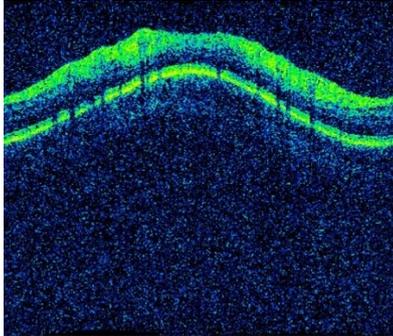
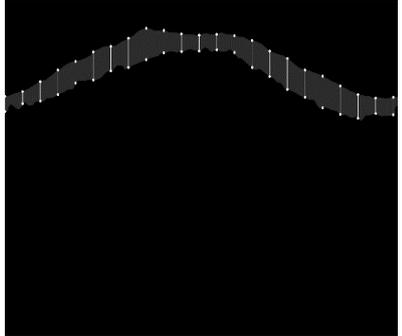
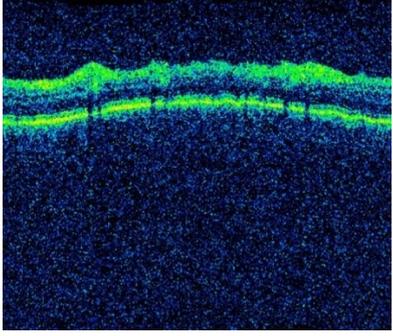
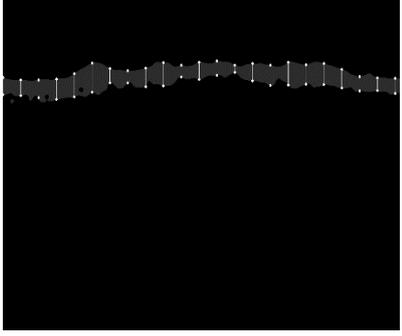
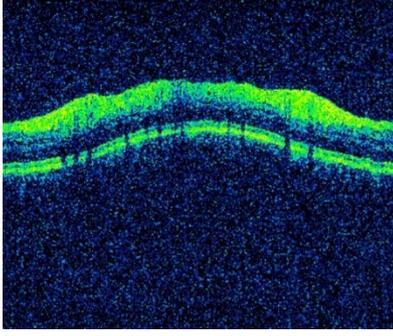
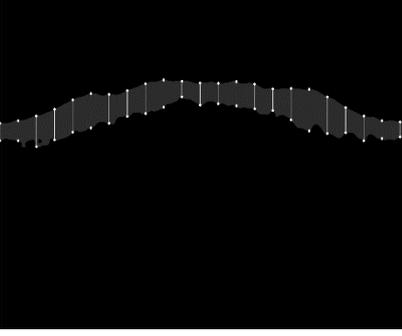
Lista de 10 pacientes para el estudio							
Paciente	Número de paciente de la lista competa	Grosor CFNR del OS [μm]	Diagnóstico clínica "Santa Lucía" del OS	Grosor CFNR del OD [μm]	Diagnóstico clínica "Santa Lucía" del OD	Género	
						F	M
1	2	71	Sospecha	52	Glaucoma		X
2	3	98	Normal	57	Glaucoma		X
3	9	84	Normal	84	Normal		X
4	14	64	Glaucoma	61	Glaucoma		X
5	15	92	Normal	92	Normal		x
6	33	56	Glaucoma	88	Normal	X	
7	34	74	Sospecha	93	Normal		X
8	48	34	Glaucoma	53	Glaucoma		X
9	56	87	Normal	83	Normal		X
10	61	86	Normal	86	Normal	X	

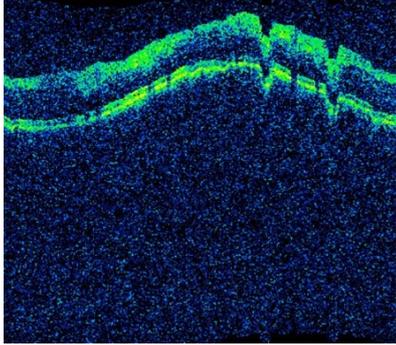
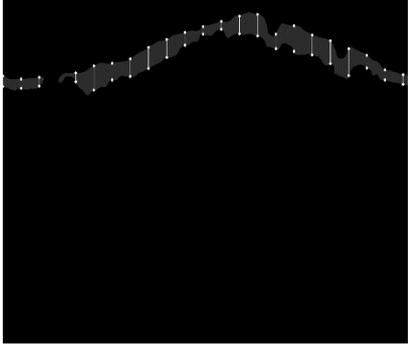
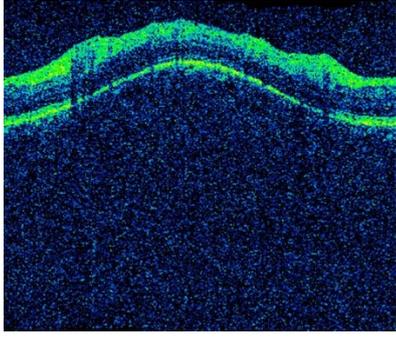
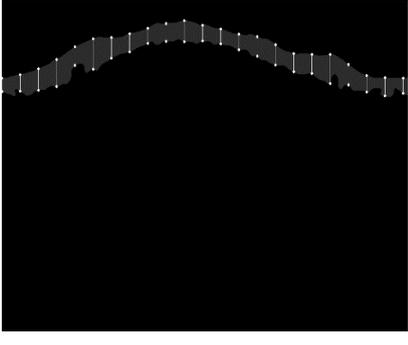
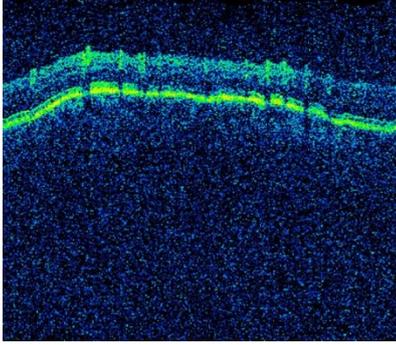
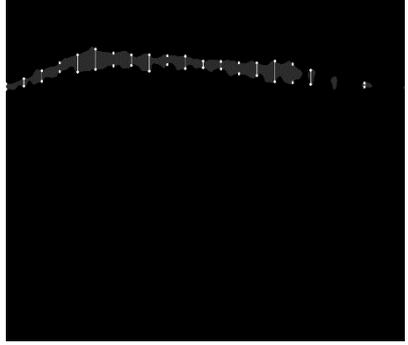
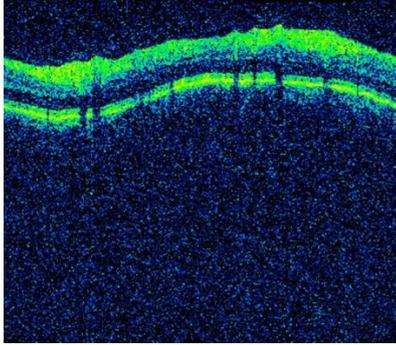
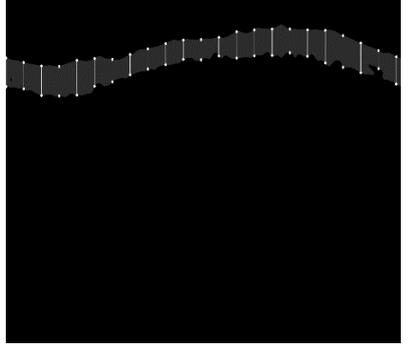
4.1 IDENTIFICACIÓN DE LA CAPA DE FIBRAS NERVIOSAS

Se estableció como primer paso aplicar el procesamiento digital a las imágenes biomédicas obtenidas del equipo OCT, con el objetivo de separar la capa de fibras nerviosas de la capa de vasos ganglionares, para el ojo izquierdo y derecho como se observa en la Tabla 4.4 y Tabla 4.5, respectivamente.

Tabla 4.4 Obtención y análisis automático de la capa de fibras nerviosas de la retina del ojo izquierdo de los pacientes, mediante el algoritmo desarrollado.

Lista de las imágenes biomédicas procesadas de los pacientes		
Paciente	Imagen biomédica del ojo izquierdo mediante el OCT	Imagen biomédica procesada del ojo izquierdo
1		

2		
3		
4		
5		

6		
7		
8		
9		

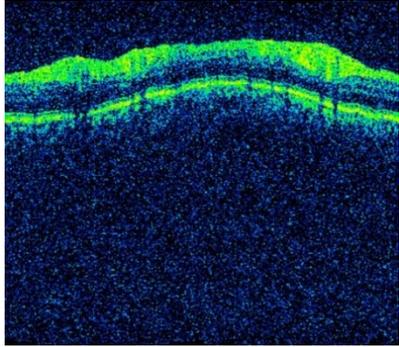
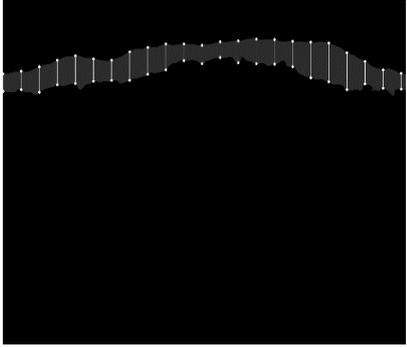
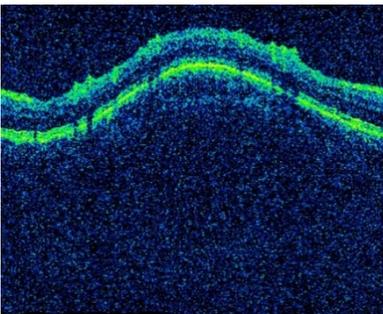
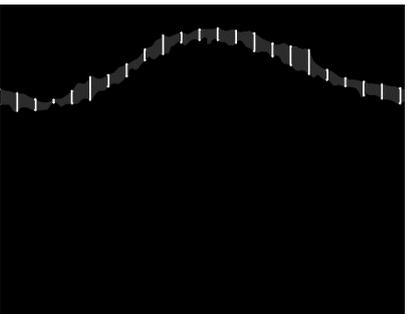
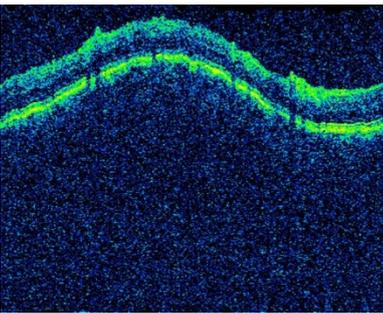
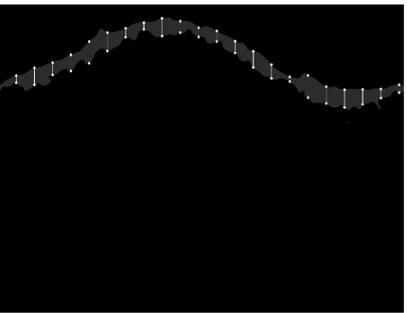
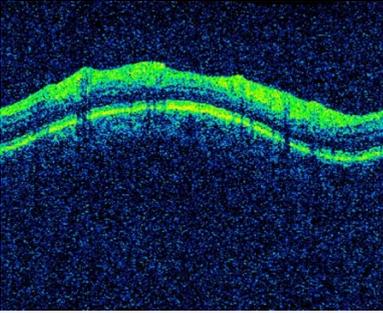
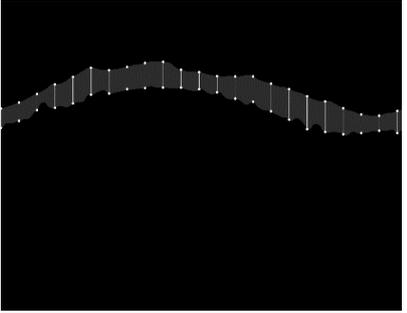
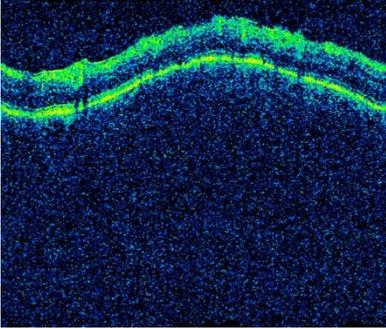
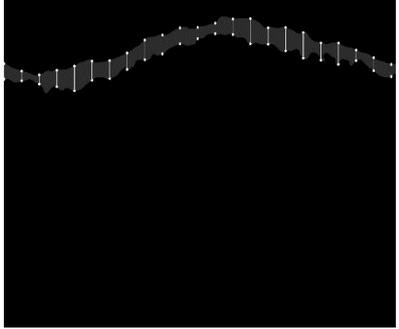
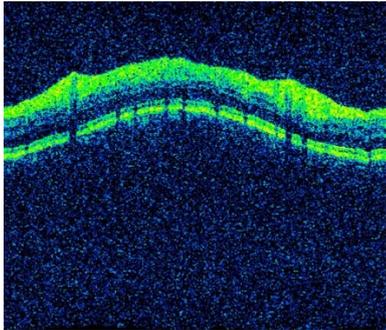
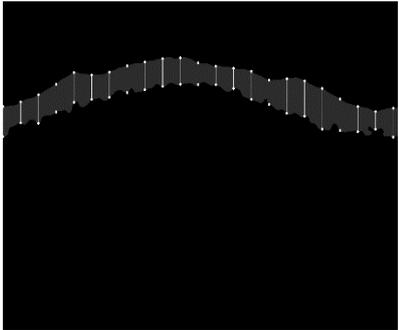
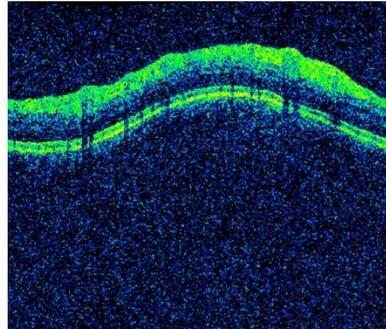
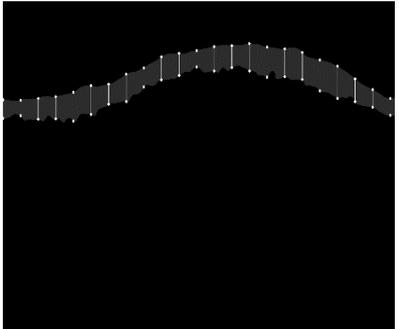
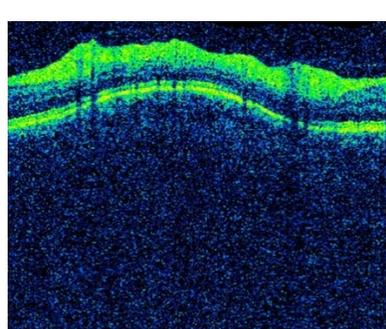
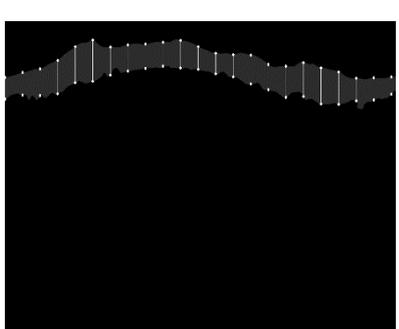
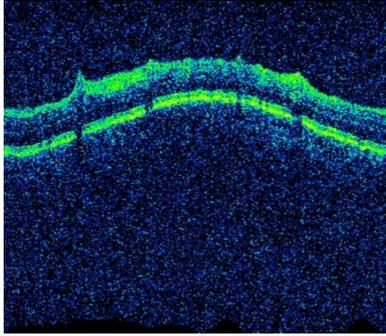
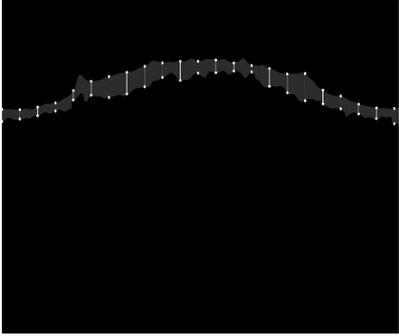
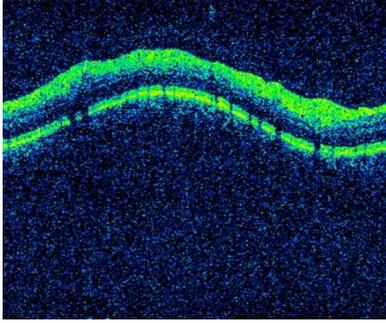
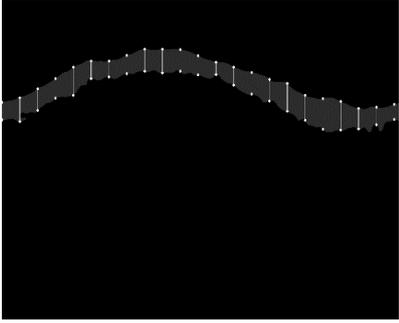
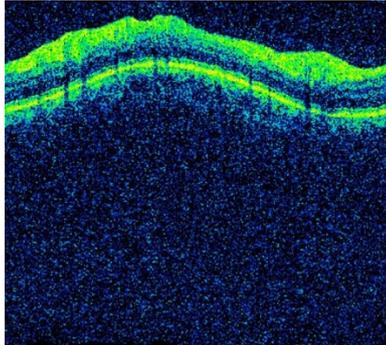
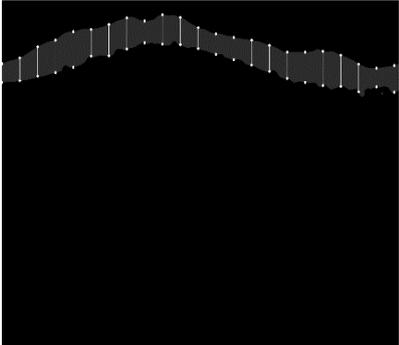
10		
----	---	--

Tabla 4.5 Obtención y análisis automático de la capa de fibras nerviosas de la retina del ojo derecho de los pacientes, mediante el algoritmo desarrollado.

Lista de imágenes biomédicas procesadas de los pacientes		
Paciente	Imagen biomédica del ojo derecho mediante el equipo OCT	Imagen biomédica procesada del ojo derecho
1		
2		
3		

4		
5		
6		
7		

8		
9		
10		

4.3 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MÉTODO RELACIÓN DE VOLUMEN DE FIBRAS NERVIOSAS DE LA RETINA

Como se mencionó anteriormente el algoritmo se aplicó a los 78 pacientes, por lo cual los resultados de este análisis para determinar la sensibilidad y especificidad que posee el método relación de grosor de volumen de fibras nerviosas de la retina se describen a continuación:

- Para determinar la sensibilidad que posee esta herramienta de soporte médico, primero se efectuó el análisis de forma individual al ojo izquierdo y derecho de los 78 pacientes, como se puede constatar en la Tabla 4.2 del Anexo 1.

- En el ojo izquierdo los 65 pacientes coincidían con el diagnóstico de la Clínica “Santa Lucia” y del ojo derecho 60 pacientes coinciden con el diagnóstico de la clínica “Santa Lucia”. Estos datos vienen a ser los Valores positivos verdaderos, esto quiere decir que 13 y 18 pacientes representan los valores falsos negativos del ojo izquierdo y derecho, respectivamente.
- Para emplear el cálculo de la especificidad, se toma en cuenta que el análisis se lo aplica de manera individual en el ojo izquierdo y en el ojo derecho.
- Para el ojo izquierdo, de la lista completa de pacientes (ver Tabla 4.2 del Anexo 1), se observa que existe 6 valores de falso positivo, así como 13 que son valores de falsos negativos, también se comprueba que 65 son valores positivos verdaderos y, al contrario 150 son valores negativos verdaderos.
- Para el ojo derecho, de la lista completa de pacientes (ver Tabla 4.2 del Anexo 1), se observa que existe 11 valores de falso positivo, así como 18 valores de falsos negativos, también se comprueba que 60 son valores positivos verdaderos y, al contrario 145 son valores negativos verdaderos.

En la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 se enuncian los valores de las cifras que corresponden a la estimación del método propuesto del ojo izquierdo y derecho, respectivamente, en donde las muestras examinadas y comparadas por 3 factores (glaucoma, sospecha, normal) por paciente, nos da como resultado total 234 muestras por cada ojo.

Tabla 4.6 Valores encontrados de la identificación de glaucoma por el método propuesto en el ojo izquierdo.

Valores positivos verdaderos	Valores negativos verdaderos	Falso positivos	Falsos negativos
65	150	6	13

Tabla 4.7 Valores encontrados de la identificación de glaucoma por el método propuesto en el ojo derecho.

Valores positivos verdaderos	Valores negativos verdaderos	Falso positivos	Falsos negativos
60	145	11	18

4.3 SENSIBILIDAD Y ESPECIFICIDAD

A la probabilidad de que a un individuo se lo pueda considerar como si estuviera enfermo y que esto sea correcto, se conoce como sensibilidad (ver ecuación 4.1). En contraste, la especificidad es la probabilidad de prescribir de manera precisa que un sujeto se encuentra sano, como se expresa en la ecuación 4.2. Se recuerda que para cumplir con este punto, el estudio se lo ejecuto tanto para el ojo izquierdo como para el derecho [72].

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{Valores positivos verdaderos}}{\text{Valores Positivos verdaderos} + \text{Falsos negativos}} \quad (4.1)$$

$$\text{Sensibilidad} = \frac{65}{65 + 13}$$

$$\text{Sensibilidad} = 0.8333 = 83.33\%$$

La sensibilidad encontrada en el ojo izquierdo, mediante la implementación del método relación de volumen de fibras nerviosas, que es una herramienta de soporte médico para la detección y prevención del glaucoma en etapas iniciales, corresponde a un 83.33%.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{Valores positivos verdaderos}}{\text{Valores Positivos verdaderos} + \text{Falsos negativos}} \quad (4.1)$$

$$\text{Sensibilidad} = \frac{60}{60 + 18}$$

$$\text{Sensibilidad} = 0.7692 = 76.92\%$$

La sensibilidad encontrada en el ojo derecho, mediante la implementación del método relación de volumen de fibras nerviosas, que es una herramienta de soporte médico para la detección y prevención del glaucoma en etapas iniciales, corresponde a un 76.92%.

$$\text{Especificidad} = \frac{\text{Valores negativos verdaderos}}{\text{Valores negativos verdaderos} + \text{Falsos positivos}} \quad (4.2)$$

$$\text{Especificidad} = \frac{150}{150 + 6}$$

$$\text{Especificidad} = 0.9615 = 96.15\%$$

La especificidad encontrada en el ojo izquierdo, mediante la implementación del método relación de volumen de fibras nerviosas, que es una herramienta de soporte médico para la detección y prevención del glaucoma en etapas iniciales, corresponde a un 96.15%.

$$\text{Especificidad} = \frac{\text{Valores negativos verdaderos}}{\text{Valores negativos verdaderos} + \text{Falsos positivos}} \quad (4.2)$$

$$\text{Especificidad} = \frac{145}{145 + 11}$$

$$\text{Especificidad} = 0.92948 = 92.95\%$$

La especificidad encontrada en el ojo derecho, mediante la implementación del método relación de volumen de fibras nerviosas, que es una herramienta de soporte médico para la detección y prevención del glaucoma en etapas iniciales, corresponde a un 92.95%.

4.4 COMPARACIÓN DE ERROR ENTRE LOS MÉTODOS EXISTENTES

La elaboración de la Tabla 4.8 y la Tabla 4.9, permite verificar todos los resultados obtenidos de los 10 pacientes, al utilizar el método relación del grosor del volumen de fibras nerviosas de la retina aplicado en este estudio.

La comparación se realiza entre los datos brindados por el médico oftalmólogo de la clínica “Santa Lucia” de la ciudad de Quito, y los datos adquiridos por el algoritmo, en el que posteriormente se brindará un diagnóstico presuntivo del paciente.

También se calcula el nivel de error que presenta el sistema en estos pacientes, para encontrar el error absoluto porcentual nos valimos de la ecuación 4.3 y 4.4, en donde tenemos que ϵ_a corresponde al error absoluto, \bar{x} es el dato clínico, x_i el dato obtenido por el algoritmo [72].

$$\epsilon_a = \frac{\bar{x} - x_i}{\bar{x}} \quad (4.3)$$

$$\epsilon_a = \frac{\bar{x} - x_i}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4.4)$$

Tabla 4.8 Comparación de los valores del ojo izquierdo de los pacientes proporcionados por la clínica “Santa Lucía”, con los datos adquiridos por el sistema empleado e indicando el error absoluto existente.

Comparación de características					
Paciente	Grosor CFNR del OS [μm]	Diagnóstico clínica “Santa Lucía” del OS	Algoritmo Grosor del OS [μm]	Diagnóstico Algoritmo del OS	Error Absoluto %
1	71	Sospecha	68.93	Sospecha	2.92
2	98	Normal	95.40	Normal	2.66
3	84	Normal	81.59	Normal	2.87
4	64	Glaucoma	65.48	Glaucoma	2.32
5	92	Normal	94.03	Normal	2.20
6	56	Glaucoma	54.66	Glaucoma	2.39
7	74	Sospecha	71.59	Sospecha	3.26
8	34	Glaucoma	33.64	Glaucoma	1.05
9	87	Normal	89.47	Normal	2.84
10	86	Normal	85.41	Normal	0.69
ERROR TOTAL					2.32

Tabla 4.9 Comparación de los valores del ojo derecho de los pacientes proporcionados por la clínica “Santa Lucía”, con los datos adquiridos por el sistema empleado e indicando el error absoluto existente.

Comparación de características					
Paciente	Grosor CFNR del OD [μm]	Diagnóstico clínica “Santa Lucía” OD	Algoritmo grosor del OD [μm]	Diagnóstico Algoritmo del OD	Error Absoluto %
1	52	Glaucoma	49.57	Glaucoma	4.68
2	57	Glaucoma	54.70	Glaucoma	4.03
3	84	Normal	88.82	Normal	5.73
4	61	Glaucoma	60.17	Glaucoma	1.36
5	92	Normal	98.37	Normal	6.92
6	88	Normal	82.60	Normal	6.13
7	93	Normal	93.98	Normal	1.06
8	53	Glaucoma	53.33	Glaucoma	0.62
9	83	Normal	81.59	Normal	1.70
10	86	Normal	93.60	Normal	8.84
ERROR TOTAL					4.11

La elaboración de este punto busca encontrar una respuesta a uno de los objetivos específicos, en el que se propone determinar cuál de los tres métodos conocidos: Relación Copa-Disco, Regla ISNT y Relación del grosor del volumen de fibras nerviosas de la retina, es el que contiene menor error, es decir, es el más

eficiente. Este proceso se lo llevo a cabo gracias a los datos proporcionados por la tesis “Desarrollo de un sistema de soporte a la detección del glaucoma a través de procesamiento digital de imágenes biomédicas del fondo de ojo y uso de software libre” [4], y también a los datos obtenidos por nuestro algoritmo, ya que nuestro tema de tesis es la continuación de la tesis anteriormente mencionada.

Es prudente mencionar, que este análisis no se lo realiza con los mismos pacientes, ya que los exámenes que se aplican en cada método, utilizan una imagen del ojo diferente, por lo tanto, la comparación entre estos métodos se la genera en base al error absoluto, que presenta la implementación de cada método. Los datos brindados son únicamente del ojo derecho, por tal razón esta comparación se genera solo de ese ojo.

A continuación, en la en la Tabla 4.10, se expresa claramente la comparación del error entre los métodos: Relación Copa-Disco, Regla ISNT y Relación del grosor del volumen de fibras nerviosas de la retina, así como los factores que intervinieron en cada estudio: como el número de pacientes y el valor del error absoluto.

Tabla 4.10 Verificación del método con menor porcentaje de error.

Nombre del método desarrollado	Número de pacientes	Valor del erro absoluto obtenido
Relación Copa-Disco	10	4.53%
Regla ISNT	10	14.61%
Relación del grosor del volumen de fibras nerviosas de la retina	10	4.11%

En esta comparación, se constató que el método relación de grosor de volumen de fibras nerviosas de la retina presenta un menor porcentaje de error absoluto del sistema en comparación con los otros métodos, con un valor de 4.11%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El glaucoma es una enfermedad que en una fase inicial se detecta mediante exámenes de Tonometría de Goldmann o de Gonioscopia, al existir presencia de glaucoma se pasa a una segunda fase en donde se utiliza la métodos más avanzados y específicos como son: método de Copa-Disco, método regla ISNT y método relación del grosor del volumen de fibras nerviosas de la retina.

El proyecto presenta un algoritmo, para la detección temprana de glaucoma como herramienta de soporte médico que podría ser utilizado por médicos o estudiantes que se encuentren cursando la carrera de oftalmología, facilitando de tal manera la valoración presuntiva del paciente. La propuesta nos permite obtener una correcta segmentación de la CFNR y calcular su grosor que es el parámetro principal para el diagnóstico de la enfermedad, con el fin de compararlo con un conjunto de pacientes de referencia. Los resultados obtenidos son válidos en la mayoría de imágenes en donde se obtiene la correcta segmentación y grosor de las fibras nerviosas de la retina.

El desarrollo de esta herramienta de soporte en el análisis y diagnóstico del glaucoma, conlleva contar con expertos en el área de oftalmología, para que brinden asesoría y puedan validar en etapas tempranas el análisis de las imágenes biomédicas obtenidas por medio del equipo OCT, con el fin de que los parámetros en el diagnóstico presuntivo de los pacientes, sean fiables y se realicen de manera correcta.

En la parte de la segmentación de las imágenes biomédicas, se presentó una dificultad al momento de tratar este tipo de imágenes, debido a sombras, presencia de

ruido, movimiento que varían en las imágenes de cada paciente, este tipo de imágenes dependen del sistema y la tecnología utilizada con las que fueron obtenidas, por lo que se recomienda que las imágenes tengan una buena resolución y se validen de manera manual para obtener resultados satisfactorios al momento del diagnóstico presuntivo.

Se pudo comprobar que el método relación del grosor del volumen de fibras nerviosas de la retina con un valor de error absoluto de 4.11%, comparado con el método de Copa-Disco con un valor de error absoluto de 4.53% y Regla ISNT con un valor de error absoluto de 14.61% que son métodos propuestos en un estudio anterior, posee un menor porcentaje de error, demostrando que existe una mejor detección y prevención del glaucoma con la implementación de este nuevo método propuesto. Este ensayo pudo variar debido a que en los tres métodos no se utiliza la misma base de datos, por motivo, de que cada método emplea una imagen del ojo diferente para su análisis y también porque el equipo OCT es nuevo en la clínica “Santa Lucia”, por ende, los pacientes y la base de datos son diferentes.

El método de relación de grosor del volumen de fibras nerviosas de la retina se lo implemento de forma individual en cada ojo, por lo tanto, posee una sensibilidad con valores de 83.33% en el ojo izquierdo y 76.92% en el ojo derecho. Al contrario, posee una especificidad con valores de 96.15% y 92.95% en el ojo izquierdo y derecho, respectivamente. Los resultados obtenidos de sensibilidad y especificidad fueron aceptados por los médicos oftalmológicos de la clínica “Santa Lucia”.

Los resultados del proyecto consisten en una herramienta auxiliar que realiza un diagnóstico presuntivo del glaucoma, por lo que su valoración no es oficial, pese a su correcto funcionamiento, se recomienda ser utilizada con más pruebas complementarias, que el médico oftalmólogo sugiera en el diagnóstico final del paciente.

El uso de software libre, tiene la ventaja de que es gratuito y de libre distribución, con el fin de que esta herramienta de soporte médico, sea empleada por los médicos o estudiantes de la carrera de oftalmología. El uso de bibliotecas es de gran ventaja, de los más importantes fue OpenCV, que nos permitió utilizar funcionalidades de inteligencia artificial para la identificación de la CFNR de las imágenes biomédicas obtenidas mediante el equipo OCT.

Para el desarrollo del proyecto, es importante contar con un esquema que indique de manera ordenada y organizada, las diferentes etapas que intervinieron en la implementación de esta herramienta de soporte médico, para detectar el glaucoma en etapas iniciales. Dando a conocer a los pacientes un diagnóstico presuntivo del glaucoma, permitiendo delimitar el proyecto y no alejarse de los objetivos propuestos.

Se recomienda, usar pesos en los píxeles de cada zona segmentada en la CFNR, con la finalidad que los píxeles con bajos niveles de intensidad, puedan contribuir con valores más pequeños para el cálculo del grosor del área de la imagen biomédica segmentada, lo que representaría la existencia o no del glaucoma en el paciente.

Como líneas de trabajo futuro proponemos las siguientes:

- Desarrollar un módulo basado en lógica difusa para, automáticamente inferir el riesgo de sufrir glaucoma de manera más directa y con menor tiempo de ejecución del algoritmo en diferentes niveles (utilizando variables lingüísticas en el diagnóstico, por ejemplo: pacientes con diagnóstico normal, sospecha y glaucoma.
- Diseñar una interfaz de aprendizaje con ejercicios interactivos, en donde los estudiantes de oftalmología se les facilite poder aprender y comprender a cabalidad la enfermedad del glaucoma.
- Diseñar y crear una red neuronal artificial para inferir automáticamente los parámetros de la ecuación utilizada para recortar la imagen en dos regiones y así identificar CFNR que es la región de interés para detectar el glaucoma en etapas tempranas. Con la finalidad de minimizar el tiempo de implementación del método propuesto, al momento de desarrollar esta red neuronal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. M. Jose and A. A. Balakrishnan, “A novel method for glaucoma detection using optic disc and cup segmentation in digital retinal fundus images,” in *2015 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015]*, 2015, pp. 1–5.
- [2] R. R. A. Bourne *et al.*, “Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis,” *Lancet Glob. Heal.*, vol. 5, no. 9, pp. e888–e897, Sep. 2017.
- [3] G. Lim, Y. Cheng, W. Hsu, and M. L. Lee, “Integrated Optic Disc and Cup Segmentation with Deep Learning,” in *2015 IEEE 27th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, 2015, pp. 162–169.
- [4] M. S. Encalada Ojeda and E. G. Gamboa Vinuesa, “Desarrollo de un sistema de soporte a la detección del glaucoma a través de procesamiento digital de imágenes biomédicas del fondo de ojo y uso de software libre,” 2016.
- [5] A. A. Salam, M. U. Akram, K. Wazir, S. M. Anwar, and M. Majid, “Autonomous Glaucoma detection from fundus image using cup to disc ratio and hybrid features,” in *2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 2015, pp. 370–374.
- [6] R. Panda, N. B. Puhan, A. Rao, D. Padhy, and G. Panda, “Recurrent neural network based retinal nerve fiber layer defect detection in early glaucoma,” in *2017 IEEE 14th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2017)*, 2017, pp. 692–695.

- [7] G. Chen, W. Li, F. Jiang, S. Mao, and Y. Tong, "Ex-PRESS Implantation versus Trabeculectomy in Open-Angle Glaucoma: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Clinical Trials," *PLoS One*, vol. 9, no. 1, p. e86045, Jan. 2014.
- [8] 2013 E. G. Pinos, ". Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Ingenierías-CIDII, Ecuador, "Método de detección por tonometría para el diagnóstico temprano del glaucoma a través de herramientas de simulación," 2018.
- [9] F. M. A. Herrera Deysi, "Implementación de Técnicas aplicadas para la identificación y prevención del glaucoma mediante el uso de imágenes médicas y software," 2016.
- [10] M. de Educación, "EDUCACIÓN INCLUSIVA: ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA OCULAR."
- [11] B. RODRIGO MORENO, "Detección de Glaucoma mediante el Análisis de Imágenes de Fondo de Ojo," Jun. 2014.
- [12] C. 2005. Hernandez, Elizabeth, Universidad Nacional Abierta y a Distancia-UNAD. Bogotá, "EVALUACION SENSORIAL."
- [13] B. Villanueva Coello, J. Manuel, M. Cotutor, and S. Morales Martínez, "Análisis de imágenes oftalmológicas de Tomografía por Coherencia Óptica OCT," 2016.
- [14] D. M^a and C. P. Marín, "Óptica Fisiológica: El sistema óptico del ojo y la visión binocular."
- [15] N. R. Kolb H, Fernandez E, "Webvision: The Organization of the Retina and Visual System - PubMed - NCBI." [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21413389>. [Accessed: 16-Jul-2018].
- [16] H. Ahmad, A. Yamin, A. Shakeel, S. O. Gillani, and U. Ansari, "Detection of glaucoma using retinal fundus images," in *2014 International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (iCREATE)*, 2014, pp. 321–324.
- [17] A. Fernández Revuelta, "Técnica de exploración del fondo de ojo," vol. Vol. 8, p. págs. 383-387.
- [18] Molina, "ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA OCULAR," 2012.
- [19] N. L. Stokoe and R. W. Turner, "Normal retinal vascular pattern. Arteriovenous ratio as a measure of arterial calibre.," *Br. J. Ophthalmol.*, vol. 50, no. 1, pp. 21–40, Jan. 1966.

- [20] E. García Garrido, “Anatomía Ocular,” *Universidad Europea de Madrid*, 2006. [Online]. Available: <http://m.patatabrava.com/es/apunte/160985/anatomia-ocular>. [Accessed: 16-Jul-2018].
- [21] G. Tortora and B. Derrickson, *Principios de Anatomía y Fisiología, 11ª edición*. 2006.
- [22] L. E. Abad, “La Mácula, Cambios Degenerativos,” no. ISBN: 978-84-7429-327-2, p. págs. 15-16, 2007.
- [23] L. R. Pasquale, “An Evidence-Based Approach to Glaucoma Care,” in *The Glaucoma Book*, New York, NY: Springer New York, 2010, pp. 23–34.
- [24] J. J. Kanski, *Oftalmología clínica*. Elsevier, 2004.
- [25] J. Antonio, A. Morón, J. Carlos, O. Parra, and M. Roda, “DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD ÓPTICA OCULAR EN PACIENTES CON GLAUCOMA MEDIANTE LA TÉCNICA DEL DOBLE PASO,” 2013.
- [26] C. Gutiérrez-Ortiz, M. Ángel, and T. Guezala, “Patología del nervio óptico.”
- [27] G. P. American Academy of Ophthalmology, “Atrofia del Nervio Óptico — AAPOS,” 2010. [Online]. Available: <https://aapos.org/es/terms/conditions/81>. [Accessed: 16-Jul-2018].
- [28] G. P. American Academy of Ophthalmology, “Primary Open-Angle Glaucoma PPP - 2015 - American Academy of Ophthalmology,” 2010. [Online]. Available: <https://www.aao.org/preferred-practice-pattern/primary-open-angle-glaucoma-ppp-2015>. [Accessed: 16-Jul-2018].
- [29] M. Goel, R. G. Picciani, R. K. Lee, and S. K. Bhattacharya, “Aqueous Humor Dynamics: A Review,” *Open Ophthalmol. J.*, vol. 4, no. 1, pp. 52–59, Sep. 2010.
- [30] G. Research Foundation, “Cómo Entender y Vivir Con Glaucoma.”
- [31] D. Patil, R. Manza, G. B.-I. J. of Computer, and undefined 2014, “Diagnose glaucoma by proposed image processing methods,” *Citeseer*.
- [32] L. Fernández Argones, F. Fumero González, C. M. Padilla González, I. Piloto Díaz, and A. I. Carcaset Chamizo, *Revista Cubana de Oftalmología.*, vol. 25. Centro Nacional de Información de Ciencias Médicas, 2012.
- [33] R. R. Bourne, “The optic nerve head in glaucoma.,” *Community eye Heal.*, vol. 19, no. 59, pp. 44–5, Sep. 2006.
- [34] G. Neeru, “Guías del Consejo Internacional de Oftalmología (ICO) para el Glaucoma,” *Int. Counc. Ophthalmol.*, pp. 2–20, 2015.

- [35] F. V. Instituto Oftalmológico, “Glaucoma secundario.” [Online]. Available: <https://www.fernandez-vega.com/especialidades/glaucoma/glaucoma-secundario>. [Accessed: 17-Jul-2018].
- [36] N. del R. Álvarez Cárdenas and C. S. Torres Ríos, “Simulación y modelamiento del ojo humano como herramienta para la prevención del glaucoma a través la medición de la presión intraocular,” 2015.
- [37] H. A. Quigley and E. M. Addicks, “Quantitative Studies of Retinal Nerve Fiber Layer Defects,” *Arch. Ophthalmol.*, vol. 100, no. 5, pp. 807–814, May 1982.
- [38] D. G.-C. opinion in ophthalmology and undefined 2002, “Optic nerve and retinal nerve fiber layer analyzers in glaucoma,” *journals.lww.com*.
- [39] M. González De La Rosa, M. González-Hernández, J. García-Feijoo, M. Sánchez Méndez, and J. García-Sánchez, “Comparación del rango de medida de defectos entre la perimetría estándar blanco/blanco y la perimetría Pulsar,” *ARCH SOC ESP OFTALMOL*, vol. 86, no. 4, pp. 113–117, 2010.
- [40] A. Tuulonen and P. J. Airaksinen, “Initial glaucomatous optic disk and retinal nerve fiber layer abnormalities and their progression.,” *Am. J. Ophthalmol.*, vol. 111, no. 4, pp. 485–90, Apr. 1991.
- [41] N. G. Strouthidis, A. Scott, N. M. Peter, and D. F. Garway-Heath, “Optic Disc and Visual Field Progression in Ocular Hypertensive Subjects: Detection Rates, Specificity, and Agreement,” *Investig. Ophthalmology Vis. Sci.*, vol. 47, no. 7, p. 2904, Jul. 2006.
- [42] R. C. Youngquist, S. Carr, and D. E. N. Davies, “Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique,” *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 3, p. 158, Mar. 1987.
- [43] D. Huang *et al.*, “Optical coherence tomography.,” *Science*, vol. 254, no. 5035, pp. 1178–81, Nov. 1991.
- [44] M. Wojtkowski, V. J. Srinivasan, T. H. Ko, J. G. Fujimoto, A. Kowalczyk, and J. S. Duker, “Ultrahigh-resolution, high-speed, Fourier domain optical coherence tomography and methods for dispersion compensation,” *Opt. Express*, vol. 12, no. 11, p. 2404, May 2004.
- [45] Instituto de la Mácula, “Campimetría visual,” 2016. [Online]. Available: <http://www.institutmacula.com/procedimiento/campimetria-visual/>. [Accessed: 17-Jul-2018].
- [46] P. J. Foster *et al.*, “Determinants of intraocular pressure and its association with

- glaucomatous optic neuropathy in Chinese Singaporeans: the Tanjong Pagar Study.,” *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, vol. 44, no. 9, pp. 3885–91, Sep. 2003.
- [47] I. Luna-Martínez, D. Margot Brechtel-Bindel, and M. Antonio de la Fuente-Torres RESUMEN, “Relación del espesor corneal central y la variación en la presión intraocular con daño al nervio óptico en pacientes mexicanos con glaucoma,” *193 Julio-Agosto*, vol. 83, no. 4, 2009.
- [48] Centre Oftalmologic VSK, “Pruebas diagnósticas,” 2016. [Online]. Available: <http://www.centrevsk.com/pruebas-diagnosticas/>. [Accessed: 17-Jul-2018].
- [49] G. D. Joshi, J. Sivaswamy, and S. R. Krishnadas, “Optic Disk and Cup Segmentation From Monocular Color Retinal Images for Glaucoma Assessment,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 30, no. 6, pp. 1192–1205, Jun. 2011.
- [50] S. Lee, M. Rajeswari, D. Ramachandram, and B. Shaharuddin, “Screening of Diabetic Retinopathy Automatic Segmentation of Optic Disc in Colour Fundus Images,” in *The 2nd International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications*, 2006, pp. 1–7.
- [51] Centro oftalmológico ICR, “Retinografía,” *ICR 2016*, 2016. [Online]. Available: <https://icrcat.com/tratamientos-pruebas/retinografia-2/>. [Accessed: 17-Jul-2018].
- [52] Optos Daytona, “Optos.com - Daytona Technical Specifications.” [Online]. Available: <https://www.optos.com/en/products/daytona>. [Accessed: 17-Jul-2018].
- [53] M. De, B. Opencv, A. Furfaro, and M. De Bibliotecasopencv, “OpenCV Ejemplos Aplicaciones y más funciones,” 2010.
- [54] J. Pablo and A. Moya, “Procesamiento y análisis de imágenes digitales,” 2012.
- [55] N. Bouaynaya, M. Charif-Chefchaoui, and D. Schonfeld, “Theoretical Foundations of Spatially-Variant Mathematical Morphology Part I: Binary Images,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 30, no. 5, pp. 823–836, May 2008.
- [56] F. G. Ortiz Zamora and Fundación Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes., *Procesamiento morfológico de imágenes en color: aplicación a la reconstrucción geodésica*. Fundación Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, 2002.
- [57] G. T. Alejandra, “Procesamiento y análisis de imágenes digitales I, Centro de

- Estudios Moleculares de la Célula,” 2007. .
- [58] W. Burger and M. Burge, “Principles of Digital Image Processing: Advanced Methods,” 2013.
- [59] B. R. ESCALANATE, “Procesamiento Digital de Imágenes.”
- [60] S. Paris and F. Durand, “A Fast Approximation of the Bilateral Filter using a Signal Processing Approach.”
- [61] G. Bellino, F. Fernandez, and G. Scarel, “Filtrado bilateral,” 2007.
- [62] EcuRed, “Modelo HSV.” [Online]. Available: https://www.ecured.cu/Modelo_HSV. [Accessed: 18-Jul-2018].
- [63] S. C. Chapra, R. P. Canale, J. Enríquez Brito, and M. del C. Roa Hano, *Métodos numéricos para ingenieros*. McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [64] D. Ascendentes, “Método del polinomio de interpolación de newton por diferencias divididas ascendentes,” pp. 1–4.
- [65] D. González Gutiérrez, “Tutorial de Qt4 Designer y QDevelop,” 2008.
- [66] G. Viera-Maza, “Procesamiento de imágenes usando opencv aplicado en raspberry pi para clasificaciones del cacao,” 2017.
- [67] L. María and F. García, “Tratamiento de Imagen y Sonido,” 2013.
- [68] C. M. Raul Igual, “Tutorial de OpenCV,” 2007.
- [69] V. M. Arévalo, J. González, and G. Ambrosio, “LA LIBRERÍA DE VISIÓN ARTIFICIAL OPENCV APLICACIÓN A LA DOCENCIA E INVESTIGACIÓN 1.”
- [70] J. Blanco Alambiaga Tutor and J. Ignacio Herranz Herruzo, “Desarrollo de una aplicación móvil para la detección clasificación de hojas de árboles,” 2015.
- [71] M. M. C. Manuel Alejandro, “Procesamiento y análisis digital de imágenes mediante dispositivos lógicos programables.”
- [72] P. Carrión Pérez, J. Ródenas García and J. Rieta Ibáñez, *Procesado de señales biomédicas*, 1st ed. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, 2007.

ANEXOS

En La Tabla 4.1 se observa la lista completa de los 78 pacientes que intervinieron en este estudio con su respectivo valor del grosor de la CFNR y diagnóstico médico concedido por la clínica “Santa Lucia”.

Tabla 4.1 Lista completa de los 78 pacientes que participaron en este estudio.

Lista completa de los 78 pacientes						
Paciente	Grosor CFNR del OS [μm]	Diagnóstico clínica “Santa Lucia” del OS	Grosor CFNR del OD [μm]	Diagnóstico clínica “Santa Lucia” del OD	Género	
					F	M
1	84	Normal	74	Sospecha		x
2	71	Sospecha	52	Glaucoma		x
3	98	Normal	57	Glaucoma		x
4	77	Normal	89	Normal	x	
5	79	Normal	88	Normal		x
6	80	Normal	102	Normal		x
7	93	Normal	86	Normal		x
8	85	Normal	76	Normal		x
9	84	Normal	84	Normal		x
10	87	Normal	93	Normal		x
11	40	Glaucoma	64	Glaucoma		x
12	90	Normal	83	Normal		x
13	79	Normal	82	Normal		x
14	64	Glaucoma	61	Glaucoma		x
15	92	Normal	92	Normal		x
16	72	Sospecha	72	Sospecha	x	
17	91	Normal	67	Sospecha	x	
18	87	Normal	93	Normal	x	
19	65	Glaucoma	58	Glaucoma	x	
20	45	Glaucoma	76	Normal	x	

21	89	Normal	82	Normal	x	
22	83	Normal	92	Normal		x
23	79	Normal	82	Normal	x	
24	93	Normal	86	Normal	x	
25	89	Normal	92	Normal		x
26	82	Normal	81	Normal	x	
27	65	Glaucoma	76	Normal		x
28	90	Normal	85	Normal	x	
29	37	Glaucoma	75	Normal	x	
30	38	Glaucoma	70	Sospecha	x	
31	77	Normal	101	Normal	x	
32	76	Normal	86	Normal	x	
33	56	Glaucoma	88	Normal	x	
34	74	Sospecha	93	Normal		x
35	69	Sospecha	62	Glaucoma	x	
36	59	Glaucoma	63	Glaucoma	x	
37	74	Sospecha	97	Normal	x	
38	55	Glaucoma	52	Glaucoma		x
39	73	Sospecha	61	Glaucoma	x	
40	110	Normal	98	Normal	x	
41	85	Normal	82	Normal	x	
42	92	Normal	91	Normal	x	
43	94	Normal	90	Normal	x	
44	82	Normal	93	Normal	x	
45	107	Normal	109	Normal		x
46	75	Sospecha	78	Normal		x
47	79	Normal	86	Normal		x
48	34	Glaucoma	53	Glaucoma		x
49	94	Normal	96	Normal	x	
50	76	Normal	70	Sospecha	x	
51	87	Normal	69	Sospecha		x
52	54	Glaucoma	83	Normal	x	
53	79	Normal	98	Normal	x	
54	109	Normal	74	Sospecha		x
55	70	Sospecha	67	Sospecha	x	
56	87	Normal	83	Normal		x
57	80	Normal	85	Normal	x	
58	108	Normal	101	Normal	x	
59	78	Normal	82	Normal	x	
60	89	Normal	93	Normal		x
61	86	Normal	86	Normal	x	
62	108	Normal	98	Normal		x
63	94	Normal	98	Normal	x	
64	63	Glaucoma	57	Glaucoma		x
65	101	Normal	101	Normal	x	
66	76	Normal	72	Sospecha	x	

67	102	Normal	99	Normal	x	
68	90	Normal	88	Normal	x	
69	88	Normal	85	Normal	x	
70	97	Normal	97	Normal	x	
71	78	Normal	84	Normal	x	
72	81	Normal	84	Normal	x	
73	108	Normal	97	Normal	x	
74	87	Normal	94	Normal	x	
75	83	Normal	97	Normal	x	
76	85	Normal	83	Normal		x
77	77	Normal	79	Normal	x	
78	68	Glaucoma	87	Normal		x

En La Tabla 4.2, en cambio se expresa los resultados adquiridos por la implementación del algoritmo, en todos los pacientes que intervinieron en este proceso.

Tabla 4.2 Comparación de los resultados del algoritmo con el diagnóstico médico.

Comparación de los factores analizados								
Paciente	Grosor CFNR del OS [μm]	Diagnóstico clínica "Santa Lucía" del OS	Algoritmo grosor del OS [μm]	Diagnóstico Algoritmo del OS	Grosor CFNR del OD [μm]	Diagnóstico clínica "Santa Lucía" del OD	Algoritmo grosor del OD [μm]	Diagnóstico Algoritmo del OD
1	84	Normal	89.51	Normal	74	Sospecha	91.89	Normal
2	71	Sospecha	68.93	Sospecha	52	Glaucoma	49.57	Glaucoma
3	98	Normal	95.40	Normal	57	Glaucoma	54.70	Glaucoma
4	77	Normal	79.98	Normal	89	Normal	94.42	Normal
5	79	Normal	81.48	Normal	88	Normal	61.47	Glaucoma
6	80	Normal	78.20	Normal	102	Normal	95.01	Normal
7	93	Normal	86.63	Normal	86	Normal	71.05	Sospecha
8	85	Normal	84.43	Normal	76	Normal	69.07	Sospecha
9	84	Normal	81.59	Normal	84	Normal	88.82	Normal
10	87	Normal	85.79	Normal	93	Normal	77.40	Normal
11	40	Glaucoma	37.87	Glaucoma	64	Glaucoma	54.12	Glaucoma
12	90	Normal	92.52	Normal	83	Normal	83.70	Normal
13	79	Normal	76.94	Normal	82	Normal	90.01	Normal
14	64	Glaucoma	65.48	Glaucoma	61	Glaucoma	60.17	Glaucoma
15	92	Normal	94.03	Normal	92	Normal	98.37	Normal
16	72	Sospecha	98.39	Normal	72	Sospecha	95.99	Normal
17	91	Normal	82.86	Normal	67	Sospecha	51.12	Glaucoma
18	87	Normal	85.92	Normal	93	Normal	93.22	Normal
19	65	Glaucoma	76.08	Normal	58	Glaucoma	55.71	Glaucoma
20	45	Glaucoma	42.33	Glaucoma	76	Normal	70.54	Sospecha
21	89	Normal	91.41	Normal	82	Normal	82.28	Normal
22	83	Normal	81.51	Normal	92	Normal	90.91	Normal

23	79	Normal	67.21	Glaucoma	82	Normal	62.01	Glaucoma
24	93	Normal	89.42	Normal	86	Normal	89.16	Normal
25	89	Normal	90.57	Normal	92	Normal	93.02	Normal
26	82	Normal	81.41	Normal	81	Normal	99.56	Normal
27	65	Glaucoma	62.05	Glaucoma	76	Normal	42.26	Glaucoma
28	90	Normal	94.39	Normal	85	Normal	75.88	Normal
29	37	Glaucoma	30.57	Glaucoma	75	Normal	54.42	Glaucoma
30	38	Glaucoma	35.33	Glaucoma	70	Sospecha	59.61	Glaucoma
31	77	Normal	73.66	Sospecha	101	Normal	85.08	Normal
32	76	Normal	75.99	Normal	86	Normal	97.17	Normal
33	56	Glaucoma	54.66	Glaucoma	88	Normal	82.60	Normal
34	74	Sospecha	71.59	Sospecha	93	Normal	93.98	Normal
35	69	Sospecha	84.14	Normal	62	Glaucoma	65.25	Glaucoma
36	59	Glaucoma	36.17	Glaucoma	63	Glaucoma	60.87	Glaucoma
37	74	Sospecha	72.21	Sospecha	97	Normal	90.68	Normal
38	55	Glaucoma	56.96	Glaucoma	52	Glaucoma	42.72	Glaucoma
39	73	Sospecha	21.48	Glaucoma	61	Glaucoma	49.62	Glaucoma
40	110	Normal	115.06	Normal	98	Normal	100.58	Normal
41	85	Normal	83.70	Normal	82	Normal	85.14	Normal
42	92	Normal	89.91	Normal	91	Normal	86.82	Normal
43	94	Normal	96.39	Normal	90	Normal	79.10	Normal
44	82	Normal	61.04	Glaucoma	93	Normal	76.28	Normal
45	107	Normal	109.40	Normal	109	Normal	108.63	Normal
46	75	Sospecha	62.95	Glaucoma	78	Normal	73.97	Sospecha
47	79	Normal	93.18	Normal	86	Normal	86.38	Normal
48	34	Glaucoma	33.64	Glaucoma	53	Glaucoma	53.33	Glaucoma
49	94	Normal	96.92	Normal	96	Normal	101.47	Normal
50	76	Normal	74.00	Sospecha	70	Sospecha	67.98	Sospecha
51	87	Normal	88.19	Normal	69	Sospecha	74.91	Normal
52	54	Glaucoma	55.55	Glaucoma	83	Normal	83.12	Normal
53	79	Normal	50.96	Glaucoma	98	Normal	80.15	Normal
54	109	Normal	111.16	Normal	74	Sospecha	77.30	Normal
55	70	Sospecha	60.25	Glaucoma	67	Sospecha	63.54	Glaucoma
56	87	Normal	89.47	Normal	83	Normal	81.59	Normal
57	80	Normal	78.81	Normal	85	Normal	63.23	Glaucoma
58	108	Normal	109.60	Normal	101	Normal	101.90	Normal
59	78	Normal	76.81	Normal	82	Normal	78.42	Normal
60	89	Normal	87.43	Normal	93	Normal	88.08	Normal
61	86	Normal	85.41	Normal	86	Normal	93.60	Normal
62	108	Normal	112.26	Normal	98	Normal	100.59	Normal
63	94	Normal	101.05	Normal	98	Normal	104.02	Normal
64	63	Glaucoma	63.69	Glaucoma	57	Glaucoma	56.86	Glaucoma
65	101	Normal	113.06	Normal	101	Normal	97.16	Normal
66	76	Normal	73.36	Sospecha	72	Sospecha	73.15	Sospecha
67	102	Normal	90.51	Normal	99	Normal	114.65	Normal
68	90	Normal	93.98	Normal	88	Normal	89.60	Normal

69	88	Normal	77.88	Normal	85	Normal	87.76	Normal
70	97	Normal	82.30	Normal	97	Normal	97.45	Normal
71	78	Normal	81.03	Normal	84	Normal	78.48	Normal
72	81	Normal	84.34	Normal	84	Normal	91.57	Normal
73	108	Normal	109.20	Normal	97	Normal	89.75	Normal
74	87	Normal	85.90	Normal	94	Normal	94.57	Normal
75	83	Normal	80.78	Normal	97	Normal	98.77	Normal
76	85	Normal	74.74	Sospecha	83	Normal	83.49	Normal
77	77	Normal	75.64	Normal	79	Normal	59.54	Glaucoma
78	68	Glaucoma	48.20	Glaucoma	87	Normal	66.65	Glaucoma