

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE SISTEMAS

UNIDAD DE TITULACIÓN

**DETECCIÓN AUTOMÁTICA DEL DISCO ÓPTICO EN
RETINOGRAFÍAS DIGITALES PATOLÓGICAS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
MAGISTER EN COMPUTACIÓN**

ADÁN FRANCISCO GUZMÁN CASTILLO

adan.guzman@epn.edu.ec

Director: MARÍA MONSERRATE INTRIAGO PAZMIÑO

monserrate.intriago@epn.edu.ec

2024

APROBACIÓN DEL DIRECTOR

Como director del trabajo de titulación “Detección Automática del Disco Óptico en Retinografías Digitales Patológicas” desarrollado por Adán Francisco Guzmán Castillo, estudiante del programa de Maestría en Computación con Mención a Sistemas Inteligentes, habiendo supervisado la realización de este trabajo y realizado las correcciones correspondientes, doy por aprobada la redacción final del documento escrito para que prosiga con los trámites correspondientes a la sustentación de la Defensa oral.

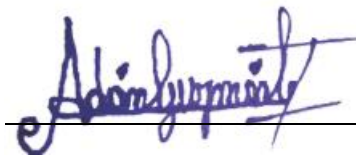
PhD. María Monserrate Intriago Pazmiño.

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Adán Francisco Guzmán Castillo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



Ing. Adán Francisco Guzmán Castillo

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a nuestro padre Dios, por su amor y misericordia hacia mí, hacia mi familia y hacia mis seres queridos. Él me ha permitido cumplir mis metas y proyectos, este trabajo va para ti. Sin el nada es posible.

A mi madre amada, por mostrarme el camino hacia la superación, su ejemplo y abnegación han permitido forjar en mi un hombre de bien. Mi amor eterno para ti mamá este trabajo lo dedico especialmente para ti.

A mi padre por aconsejarme, apoyarme y guiarme con su sabiduría en cada etapa de mi vida. Su apoyo incondicional me ha permitido cumplir una meta más.

A mis hermanos César y Carla por su cariño y apoyo en cada paso que doy. Se que mis logros son también los suyos.

A mi amada sobrina Victoria, por su cariño y afecto a tan temprana edad.

A Nancy, mi fiel compañera de vida, su amor ha estado en las buenas y en las malas, te comparto esta dedicatoria también a ti por tu incondicional compañía en mi vida.

Adán Francisco

AGRADECIMIENTO

Agradezco mucho a Dios, por su infinito amor al acompañarme cada día y permitirme cumplir una meta más en mi vida. A Jesús el amigo que nunca falla.

A mi amada madre Graciela, por todas las veces que con su cariño y abnegación me apoyó de todas las formas. Es un pilar fundamental en mi vida y sin lugar a duda mi mayor fuente de inspiración.

A mi querido padre Adán, por apoyarme en todos mis proyectos académicos y en mi vida a pesar de cualquier circunstancia.

A mis amados hermanos César y Carla, por su apoyo y cariño incondicional en todo momento, su compañía es una motivación que me da impulso para seguir adelante.

A mi pequeña sobrina Victoria, su amor temprano ha sido en mi una fuente perpetua de inspiración.

A Nancy, por su amor incondicional, mi fiel compañera de vida en cada paso que doy.

Una gratitud especial a PhD. Monserrate Intriago, quien con su profesionalismo y guía fue indispensable para el desarrollo de este trabajo de titulación. Su dirección desde que comenzó esta travesía académica en la EPN me ha permitido desarrollar este tema, y sin su paciencia y esmero no hubiera sido posible concluir este proyecto. Que Dios la bendiga.

A la Escuela Politécnica Nacional, por todos los conocimientos adquiridos durante mi Pregrado y ahora en mi Posgrado. Fueron años duros, pero felices, ya que me forjaron como un buen profesional.

Gracias totales.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-------------|
| RESUMEN | VI |
| ABSTRACT | VII |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | VIII |
| 1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN | 2 |
| 1.2. OBJETIVO GENERAL | 2 |
| 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 1.4. HIPÓTESIS O ALCANCE | 2 |
| 1.5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 2 |
| 1.6. TRABAJOS RELACIONADOS | 6 |
| 1.7. ENTORNO DE DESARROLLO | 7 |
| 1.8. CASO DE ESTUDIO | 8 |
| CAPÍTULO 2. MÉTODO | 11 |
| 2.1. CONJUNTOS DE IMÁGENES | 11 |
| 2.2. FILTROS DE PREPROCESAMIENTO | 15 |
| 2.3. MÉTRICA CUANTITATIVA | 17 |
| 2.4. PROPUESTA DE DETECCIÓN DEL DISCO ÓPTICO | 18 |
| CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 25 |
| 3.1. CONJUNTOS DE IMÁGENES APLICADOS EN LA DETECCIÓN DE DO: PRIMERA PROPUESTA | 25 |
| 3.2. CONJUNTOS DE IMÁGENES APLICADOS EN LA DETECCIÓN DE DO: SEGUNDA PROPUESTA | 34 |
| 3.3. ANÁLISIS GENERAL DE LAS DETECCIONES DE DO EN LOS CONJUNTOS DE IMÁGENES ESTUDIADOS | 43 |
| CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 47 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 48 |
| ANEXOS | 51 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Iglesia de San Francisco, Quito. Imagen capturada por una cámara digital..... | 3 |
| Figura 2 - Imagen ampliada en la cual se puede observar una porción de píxeles..... | 4 |
| Figura 3 - Matiz..... | 4 |
| Figura 4 – Saturación..... | 5 |
| Figura 5 – Luminosidad..... | 5 |
| Figura 6 - Representación de celdas en formato matriz MxN de una imagen digital. | 6 |
| Figura 7 - Fondo de ojo. | 9 |
| Figura 8 - Localización del disco óptico dentro del ojo [21]..... | 10 |
| Figura 9 - Muestra de imágenes en DiaretDB1. | 12 |
| Figura 10 - Muestra de imágenes en HRF..... | 13 |
| Figura 11 - Muestra de imágenes de DRISHTI-TEST..... | 14 |
| Figura 12 - Muestra de subconjunto de imágenes de DRIONS-DB | 15 |
| Figura 13 - Esquema de proceso completo de filtramiento de fondo de ojo..... | 16 |
| Figura 14 - Proceso de filtramiento para una imagen en Drishti en Matlab..... | 17 |
| Figura 15 - División por regiones de 3x3 para aplicación de entropía por cada una de ellas [35]. | 19 |
| Figura 16 - Método alternativo de ventanas deslizantes para detección de DO [35]. | 19 |
| Figura 17 - Valores de entropía por cada bloque en drishtiGS_023. | 20 |
| Figura 18 - Detección del DO tras primer barrido en drishtiGS_023. | 21 |
| Figura 19 - DO localizado en bloque candidato tras aplicación de etapa 2 en 12_g de HRF. | 22 |
| Figura 20 - Proceso resultante tras la completación de blob. | 23 |
| Figura 21- Bloque candidato y el DO detectado en DRIONS..... | 23 |
| Figura 22 - Muestra de resultados de detección tras primera etapa de barrido en Diaret-DB. | 26 |
| Figura 23 – Muestra de resultados de detección tras segunda etapa de barrido en Diaret-DB..... | 26 |
| Figura 24 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en Diaret-DB. | 27 |
| Figura 25 - Muestra de resultados de detección tras primera etapa de barrido en HRF..... | 28 |

| | |
|---|----|
| Figura 26 - Muestra de resultados de detección tras segunda etapa de barrido en HRF. | 28 |
| Figura 27 - Muestra de imágenes donde se detectó parcialmente el DO en HRF. | 28 |
| Figura 28- Muestra de resultados de detección tras primera etapa de barrido en Drishti-GS Training. | 30 |
| Figura 29 - Muestra de resultados de detección tras segunda etapa de barrido en Drishti-GS Training. | 30 |
| Figura 30 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en Drishti-GS Training. | 31 |
| Figura 31 - Muestra de resultados de detección tras primera etapa de barrido en Drishti-GS Test. | 31 |
| Figura 32 - Muestra de resultados de detección tras segunda etapa de barrido en Drishti-GS Test. | 32 |
| Figura 33 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en Drishti-GS Test. | 32 |
| Figura 34 - Muestra de resultados de localización tras primera etapa de barrido en Drions. | 33 |
| Figura 35 - Muestra de resultados de localización tras segunda etapa de barrido en Drions. | 33 |
| Figura 36 - Muestra de imágenes donde se localizó parcialmente el DO en Drions. | 34 |
| Figura 37 - Muestra de imágenes donde no se localizó el DO en Drions. | 34 |
| Figura 38 - Muestra de resultados de detección completa del DO en Diaret-DB. | 35 |
| Figura 39 – Muestra de resultados de detección parcial del DO en Diaret-DB. | 36 |
| Figura 40 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en Diaret-DB. | 36 |
| Figura 41 - Muestra de resultados de detecciones totales o completas del DO en HRF. | 37 |
| Figura 42 - Muestra de detección parcial del DO en HRF. | 37 |
| Figura 43 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en HRF. | 37 |
| Figura 44- Muestra de imágenes de detección completa del DO en Drishti-GS Training. | 39 |
| Figura 45 - Muestra de imágenes donde se detectó parcialmente el DO en Drishti-GS Training. | 39 |
| Figura 46 - Muestra de imagen donde no se detectó el DO en Drishti-GS Training. | 39 |
| Figura 47 - Muestra de imágenes de detección completa del DO en Drishti-GS Test. | 40 |
| Figura 48 - Muestra de imágenes en las que se detectó parcialmente el DO en Drishti-GS Test. | 40 |
| Figura 49 - Muestra de imagen donde no se detectó el DO en Drishti-GS Test. | 41 |
| Figura 50 - Muestra de imágenes de detección completa del DO en Drions. | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 51 - Muestra de imágenes en las que se detectó parcialmente el DO en Drions..... | 42 |
| Figura 52 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en Drions. | 42 |
| Figura 53 - Diagrama con las proporciones de detección de DO en conjuntos de imágenes. | 44 |
| Figura 54 - Resultados totales en conjuntos de imágenes con la aplicación de segunda propuesta de detección..... | 46 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 - Características visuales de DRIONS..... | 14 |
| Tabla 2 – Tasas de detección del DO en Diaret-DB..... | 25 |
| Tabla 3 – Tasas de detección del DO en HRF..... | 27 |
| Tabla 4 – Tasas de detección del DO en Drishti-GS Training..... | 29 |
| Tabla 5 – Tasas de detección del DO en Drishti-GS Test..... | 29 |
| Tabla 6 - Tasas de detección del DO en Drions..... | 32 |
| Tabla 7 – Número de imágenes con localización y no localización del DO en Diaret-DB..... | 35 |
| Tabla 8 – Tasas de detección del DO en Diaret-DB..... | 35 |
| Tabla 9 – Número de imágenes con detección completa, parcial y no detección del DO en HRF..... | 36 |
| Tabla 10 – Tasas de detección del DO en HRF..... | 36 |
| Tabla 11 – Número de imágenes con detecciones del DO en Drishti-GS Training..... | 38 |
| Tabla 12 – Porcentajes de detección del DO en Drishti-GS Training..... | 38 |
| Tabla 13 – Número de imágenes de detecciones del DO en Drishti-GS Test..... | 39 |
| Tabla 14 – Porcentajes en detecciones del DO en Drishti-GS Test..... | 40 |
| Tabla 15 – Cantidad de imágenes con detección y no detección del DO en Drions..... | 41 |
| Tabla 16 – Porcentajes de detección del DO en Drions..... | 41 |
| Tabla 17 - Resultados totales de detecciones, detecciones parciales y no detecciones por cada conjunto de imágenes..... | 43 |
| Tabla 18 – Resultados totales de detección obtenidos en conjuntos de imágenes propuestos..... | 44 |
| Tabla 19 – Porcentaje promedio de detección del DO en conjuntos de imágenes propuestos..... | 44 |
| Tabla 20 - Resultados totales de detección por cada conjunto de imágenes..... | 45 |
| Tabla 21 - Resultados en conjuntos de imágenes de detecciones de DO completas, parciales y no detecciones..... | 46 |
| Tabla 22 - Promedio porcentual de detecciones totales de DO..... | 46 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|--|-----------|
| Anexo I – Criterios de evaluación para el Documento Escrito del Trabajo de titulación | 64 |
|--|-----------|

RESUMEN

En el presente trabajo se estudian técnicas de visión artificial para la detección del disco óptico (DO) en imágenes médicas con patología de fondo de ojo. Este estudio incluye el análisis de imágenes de cuatro conjuntos de imágenes públicos utilizados en otras investigaciones científicas. Se implementan correcciones de nitidez, contraste, equalización de histograma adaptativo limitado por contraste (*CLAHE*). Finalmente, se ejecuta la métrica de entropía para determinar según su resultado, la localización del disco óptico en un bloque candidato.

Se proponen dos métodos de localización del DO que permitirán localizarlo de forma cuantitativa en los dos casos. El primer método localizará el DO en dos etapas dividiendo la imagen en 9 bloques y en ventanas deslizantes; el bloque con mayor entropía será en donde se encuentre el disco óptico. El segundo método localizará el DO directamente a través de cinco ventanas deslizantes; el bloque candidato será el que tenga mayor entropía y donde estará localizado el DO. Las pruebas permiten comprobar que la métrica de Entropía proporciona resultados que permiten localizar, de forma cuantitativa, el disco óptico de la mayoría de las imágenes; los mejores resultados para el primer método fueron del 96.08% en Drishti-GS Test y para el segundo método fueron de 91.84% en Drishti-GS Training. La métrica Entropía es aplicada en cada región de la imagen. El tamaño del bloque ha sido previamente determinado, y se puede concluir experimentalmente que la obtención de mejores resultados se consigue con nueve bloques de igual tamaño en la imagen analizada.

Palabras clave: disco óptico, entropía, ventana deslizante, preprocesamiento.

ABSTRACT

In the current work, machine vision techniques for optic disc (OD) detection in medical images with fundus pathology are studied. This study includes the analysis of images from four public image sets used in other scientific investigations. Sharpness, contrast, contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) corrections are implemented. Finally, the Entropy metric is run to determine according to its result, the location of the optical disk in a candidate block.

Two methods of OD localization are proposed that will allow to locate the optical disc quantitatively in the two cases. The first method will locate the OD in two stages by dividing the image into 9 blocks and sliding windows; the block with the highest entropy will be the one where the optical disk is located. The second method will locate the OD directly through five sliding windows; the candidate block will be the one with the highest entropy and that is where the OD will be located. The tests allow to verify that the Entropy metric provides results that allow to locate, in a quantitative way, the optical disk of most of the images; the best results for the first method were 96.08% in Drishti-GS Test and for the second method were 91.84% in Drishti-GS Training. The Entropy metric is applied to each region of the image. The block size has been previously determined, and it can be experimentally concluded that the best results are obtained with nine blocks of equal size along the analyzed image.

Keywords: optical disk, entropy, sliding window, preprocessing.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La visión o sentido de la vista es uno de los órganos sensoriales más significativos e importantes del cuerpo humano. A su vez, la anatomía ocular está conformada por tres capas o envolturas: Túnica fibrosa externa, conformada por las regiones esclerótica y la córnea, la túnica vascular media que está conformada por la coroides, cuerpo ciliar e iris y la tercera capa llamada retina. La retina es una estructura intrincada que desempeña un papel fundamental en el complejo proceso de la visión. Comprender su morfología y función es esencial para apreciar las complejidades de cómo percibimos el mundo que nos rodea. Su función principal es convertir la luz recibida en impulsos eléctricos enviadas al cerebro, permitiendo que el ser humano pueda ver. La retina es capturada en imágenes conocidas como retinografías o de fondo del ojo. Dentro de la retina se localiza el disco óptico (DO), el cual es una pequeña superficie circular situada en el centro de la retina y que mide aproximadamente entre 1.5 x 2.5 mm; este no posee sensibilidad a los estímulos luminosos. Dentro de los alcances clínicos, el examen del DO es un aspecto mandatorio rutinario. Los posibles cambios en el contorno del DO sean estas una hinchazón o atrofia, pueden ser indicativos de afecciones oculares y sistémicas, como el glaucoma, neuritis óptica o aumento en la presión intracraneal. Por lo que, varios estudios científicos se han enfocado en la detección del DO que permitan determinar con antelación una posible enfermedad. La detección del DO abarca diferentes métodos algorítmicos que permitan ubicar y localizar la zona del DO independientemente de la disposición, resolución, y calidad de la imagen que se esté analizando. Para lograr un método efectivo de detección del DO se aplican algoritmos de procesamiento digital de imágenes y de aprendizaje automático. La calidad de la imagen es inminentemente fundamental, ya que debe permitir distinguir las partes de la retina. Para conseguir un mejoramiento en la calidad de una imagen, es necesario considerar una fase de preprocesamiento que logre determinar y asegurar la calidad de una imagen digital.

Por lo expuesto, en este trabajo se propone identificar los siguiente:

- Un sistema que inicialmente mejore la calidad de una imagen por medio de operaciones de morfología matemática.
- Un sistema que permita localizar el disco óptico en retinografías que posean alguna patología.

El algoritmo propuesto podrá identificar, tras la aplicación de una técnica cuantitativa, la localización del DO.

1.1. Pregunta de investigación

¿Qué métodos de visión artificial permiten detectar automáticamente el DO en imágenes retinianas con presencia de alguna patología?

1.2. Objetivo general

Implementar y analizar métodos de visión artificial que permitan detectar automáticamente el DO en imágenes retinianas con presencia de alguna patología.

1.3. Objetivos específicos

1. Estudiar métodos de detección del DO en imágenes retinianas con presencia de retinopatía diabética o retinopatía de la prematuridad.
2. Analizar los algoritmos de filtrado en el fondo de ojo.
3. Implementar un método de localización del DO que alcance porcentajes altos de precisión en conjuntos de imágenes patológicas.

1.4. Hipótesis o Alcance

La aplicación de métodos de visión artificial en retinografías digitales permitirán localizar e identificar el disco óptico.

1.5. Fundamentos Teóricos

Para el estudio de técnicas de detección del DO en retinografías, se tomarán en cuenta los siguientes fundamentos teóricos. Paralelamente se seleccionará un entorno de desarrollo integrado y lenguaje de programación.

1.5.1. Imagen Digital

En la rama de la visión por computadora, una imagen digital es la representación de una escena visual de dos dimensiones, que incluyen un conjunto finito de valores digitales, también conocidos como píxeles [1]. Dichos valores digitales están relacionados a la intensidad de la luz en cada punto de la imagen. Por otro lado, las imágenes digitales son almacenadas y procesadas en computadores como matrices de datos numéricos, donde

cada elemento de la matriz representa un píxel [2]. La Figura 1 muestra una escena visual de dos dimensiones o imagen digital.



Figura 1 - Iglesia de San Francisco, Quito. Imagen capturada por una cámara digital.

1.5.2. Píxel

El píxel hace referencia a un elemento de una imagen. En la imagen digital, un píxel es el elemento individual más pequeño de una imagen, que simboliza un único punto de esta [3]. Cada píxel contiene información sobre el color y la intensidad de la luz en su ubicación específica [3]. En la figura 2, se puede observar la representación de un píxel en una imagen digital de dimensión 3000x400 o de 12 Megapíxeles (MP). Un MP es un millón de píxeles. El término de MP aparece con más frecuencia en fotografías; sin embargo, las resoluciones de pantalla pueden medirse en megapíxeles. Por ejemplo, la resolución de 4K tiene aproximadamente 12 MP y la de 1080p tiene 2,1 MP [3]. En fotografía, los megapíxeles suelen referirse a la resolución de una imagen y al número de elementos del sensor de imagen de las cámaras digitales. Por ejemplo, la cámara Sony A7 III [4] puede hacer fotos de 24,2 MP, lo que equivale a 24.200.000 píxeles.

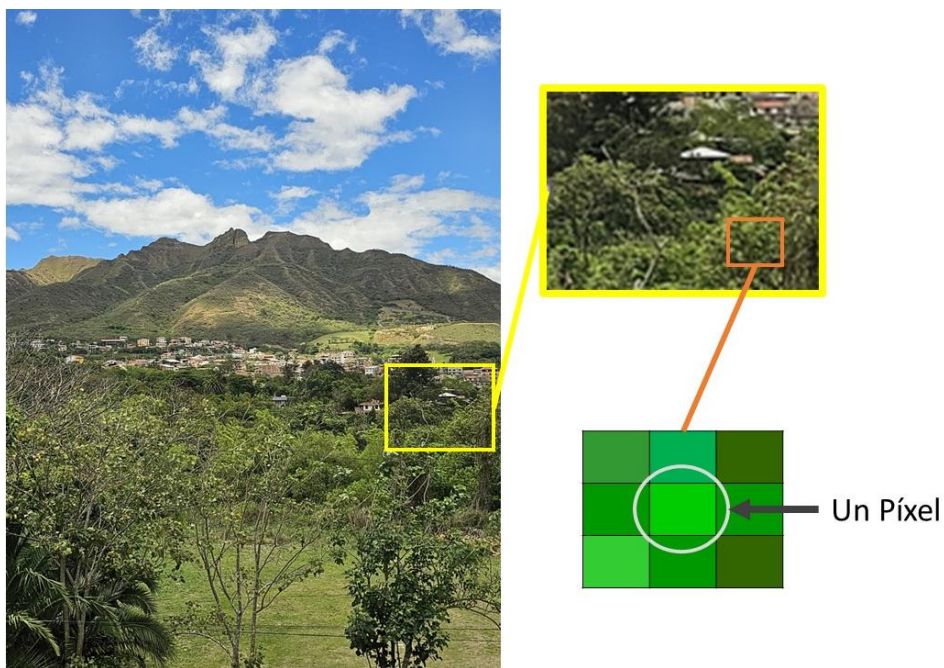


Figura 2 - Imagen ampliada en la cual se puede observar una porción de píxeles.

1.5.3. Color

En una imagen a color, cada píxel se compone de tres canales: rojo, verde y azul (RGB: Red, Blue & Green por sus siglas en inglés) [5]. La combinación de estos canales determina el color general del píxel. Las imágenes en escala de grises, el píxel como valor único representa la intensidad de la luz, donde los valores más altos suelen corresponder a zonas más brillantes. Por otro lado, la densidad de píxeles en una imagen afecta a su nitidez y detalle. Una mayor densidad de píxeles suele dar como resultado una imagen más nítida y detallada [5]. En la teoría del color [6], las propiedades del color son aquellos atributos que cambian y hacen único a cada color. Existen tres características trascendentales para diferenciar cualquier color: matiz, saturación y luminosidad [7].

El matiz o tono, es el nombre que se le otorga a cada color. Cuando se menciona el rojo, azul o verde se está hablando del matiz [7]. En la Figura 3 se puede observar el tono de cada color.



Figura 3 - Matiz.

La saturación se la define como el grado de pureza o intensidad cromática que posee un color, siendo los colores más puros los primarios [8]. De la misma forma representa la cantidad de gris que contiene la mezcla de un color concreto. Cuanto mayor es la cantidad de gris contenida en un color, menor será su saturación y en consecuencia se verá el color como que estuviera opaco [8]. Por otra parte, cuanto menor sea la cantidad de gris en un color, mayor será su saturación o pureza. La Figura 4 muestra un ejemplo de la intensidad cromática que posee un color.



Figura 4 – Saturación.

La luminosidad o también conocida como valor, es la claridad u oscuridad que posee un color [8]. La luminosidad es considerada también por la proximidad de un color determinado al blanco o negro. También puede ser definida como la cantidad de luz que tiene un matiz cuando se compara con otros colores [8]. Una analogía de luminosidad se presenta cuando a mayor porcentaje de blanco, más claro o luminoso será un color y a mayor porcentaje de negro, este será más oscuro [8]. La Figura 5 muestra un ejemplo de la proximidad entre claridad y oscuridad referente a la luminosidad.



Figura 5 – Luminosidad.

1.5.4. Representación Digital

En los sistemas digitales, las imágenes se representan como matrices de píxeles, donde cada elemento de la matriz corresponde al valor de un píxel [9]. Esta representación permite a los ordenadores almacenar, procesar y manejar imágenes. Una imagen de dos dimensiones es una función continua $f(x, y)$ donde x e y representan las coordenadas del plano [10]. La función $f(x, y)$ representa la intensidad o nivel de gris que posee la imagen

en ese punto [10]. Al mismo tiempo, si x e y son discretos y finitos, entonces la imagen es digital [10]. Finalmente, la imagen digital tendrá su representación en formato de matriz, dividida en M filas y N columnas; cada celda de la matriz representa un píxel, tal como se muestra en la Figura 6.

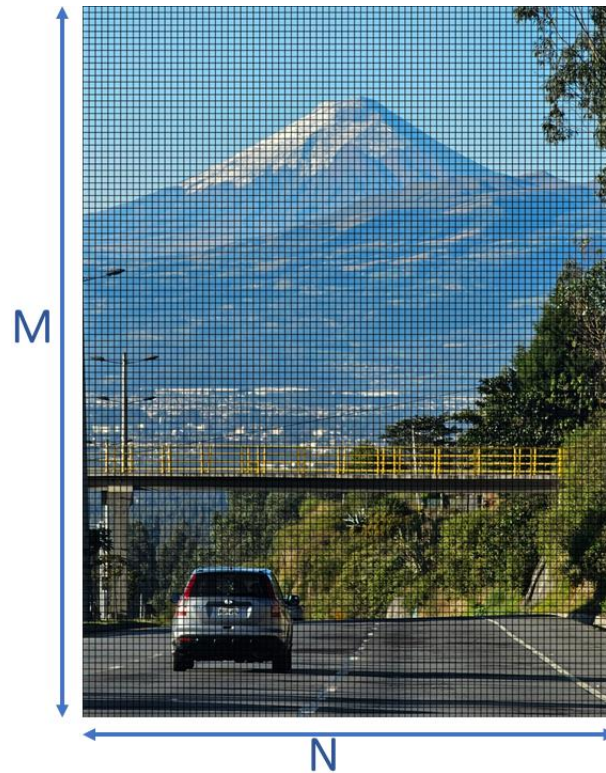


Figura 6 - Representación de celdas en formato matriz $M \times N$ de una imagen digital.

1.6. Trabajos relacionados

En la literatura, existen diversos estudios basados en la detección y segmentación del DO en fondos de ojo. Al explorar las investigaciones realizadas sobre la ubicación del DO, se encontraron varias técnicas de procesamiento de imágenes, tal como operaciones morfológicas, filtros de extracción de bordes, segmentación y transformada de Hough. Los trabajos relacionados se han centrado en determinar la ubicación del DO en cualquier parte de la imagen retiniana. Al mismo tiempo, el objetivo es identificar el DO en imágenes patológicas con un error mínimo dentro de un determinado número de conjuntos de imágenes; esta localización debería distinguir el DO de otras estructuras del ojo sin importar que existan partes similares y que al mismo tiempo sean un apoyo para el desarrollo de un posible sistema de diagnóstico de enfermedades vinculadas a la visión, por ejemplo, la retinopatía diabética.

En el estudio de [11] se plantea un método de detección del disco óptico por medio de una máscara de convolución circular concéntrica de tamaño variable aplicando la transformada

rápida de Fourier. El proceso de detección del DO inicia rellenando el área del fondo negro con el valor medio de la zona de la retina en una imagen de fondo de ojo en escala de grises; la convolución se aplica con máscaras circulares concéntricas de tamaño variable por medio de la transformada rápida de Fourier; finalmente se selecciona el píxel con la intensidad más alta, el cual determina la posición del DO.

En otro estudio, Lesay et al., proponen la de localización del DO con la aplicación en gradientes llamada FRST (Fast Radial Symmetry Transform) para encontrar formas aproximadamente circulares o elípticas en una imagen de fondo de ojo preprocesada; la tasa de éxito de localización fue del 92.38% en 50 imágenes de Messidor [12].

Por otra parte, en el estudio de [13], la localización del DO se logra eliminando los vasos sanguíneos mediante operadores morfológicos en la imagen de fondo de ojo; este proceso se complementó con la binarización de la imagen preprocesada sin los vasos sanguíneos, dicha imagen contine al DO y otras partes; en todas las partes se calcula un perímetro y un área de redondez cuyas métricas más cercanas a 1 indican que el objeto es aproximadamente circular o elíptico derivando en la localización del DO.

En [14], para la localización del DO se plantea la eliminación iterativa del fondo en una imagen preprocesada; la eliminación se evalúa a partir de la intensidad de la imagen mediante un análisis estadístico. El cálculo de entropía en los datos de la imagen se utiliza para comparar con una nueva entropía tras la reducción de intensidad en los datos de la imagen. La repetición de la reducción de intensidad se realiza hasta obtener el valor de entropía definido. Por consiguiente, la localización del disco óptico está en el centro del vaso sanguíneo que tiene la máxima varianza y que es el origen del vaso distribuido en el eje vertical [14].

Por tanto, tras el análisis de los trabajos relacionados, en este actual trabajo se propone una técnica de localización que utilice una métrica cuantitativa apoyada en operaciones morfológicas que incluso funcione en presencia de estructuras patológicas.

1.7. Entorno de desarrollo

Para la implementación de los algoritmos de este trabajo de investigación, se escogió el sistema de cómputo numérico Matlab 2022b. Las razones por las cuales se escogió este entorno de desarrollo fueron las siguientes:

- La universidad concede su licencia académica completa.
- MATLAB combina un entorno de escritorio para el análisis iterativo y procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arrays directamente [15].

- Lenguaje de alto nivel para cálculos científicos e ingeniería [16].
- Gráficas para visualizar datos y herramientas para crear diagramas personalizados [16].
- Aplicaciones para ajustar curvas, clasificar datos, analizar señales, ajustar sistemas de control y muchas otras tareas [16].
- Toolboxes complementarias para una amplia variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería [16].
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas [16].
- Interfaces para C/C++, Java, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft Excel [16].

Cuando se trabaja con esta herramienta, es necesario indicar que la herramienta de Image Processing Toolbox de Matlab proporciona una amplia gama de algoritmos estándar de referencia y aplicaciones de flujo de trabajo en imágenes para procesar, visualizar, analizar y desarrollar algoritmos [17]. Adicionalmente se puede realizar segmentación, perfeccionamiento, reducción de ruido, transformaciones geométricas y registro de imágenes utilizando deep learning y técnicas tradicionales de procesamiento de imágenes [17]. Este toolbox ofrece soporte para el procesamiento de imágenes en 2D y 3D, además de imágenes de gran tamaño [17].

1.8. Caso de estudio

En el presente trabajo de investigación, se estudió un caso en particular de imágenes médicas de la retina, tomadas de un examen oftalmológico llamado fondo de ojo.

1.8.1. Fondo de ojo

El examen de fondo de ojo muestra la superficie interior del ojo, incluida la retina, la mácula, el disco óptico y los vasos sanguíneos. Es un examen rutinario que permite observar a través de la pupila dilatada [18]. Gracias a este examen, se puede obtener información de las estructuras más importantes de la parte posterior del globo ocular especialmente en la retina, así como también lograr un diagnóstico y seguimiento de otras patologías oftalmológicas [18]. Además, en la imagen generada se puede observar toda la arquitectura del ojo, junto con casi todas sus estructuras internas. Las estructuras anatómicas exploradas son el nervio óptico, mácula, arcadas vasculares y retina periférica. Al mismo tiempo, cuando se realiza la exploración del fondo de ojo, se puede diagnosticar enfermedades como degeneración macular asociada a la edad, glaucoma, miopía,

retinopatía diabética, entre otros [19]. Un ejemplo de una imagen digital de fondo de ojo se muestra en la Figura 7.



Figura 7 - Fondo de ojo.

1.8.2. Disco óptico

El disco óptico es una estructura fundamental del ojo, siendo este el punto de salida del nervio óptico [20]. Está localizado en la parte posterior del ojo, donde el nervio óptico se conecta con la retina, tal como se muestra en la Figura 8.

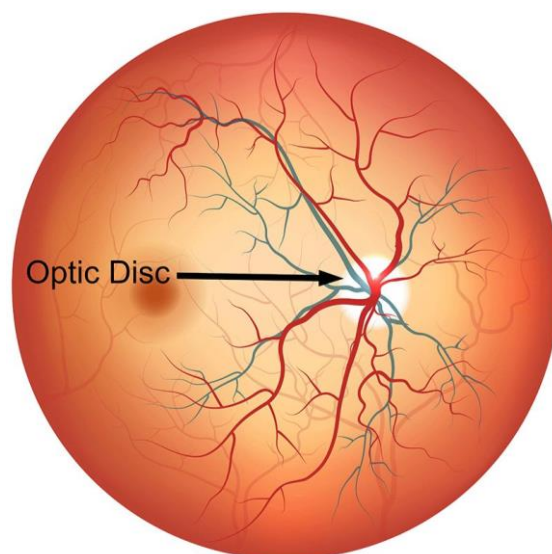


Figura 8 - Localización del disco óptico dentro del ojo [21].

Así pues, el disco óptico es una zona circular que carece de células fotorreceptoras, por lo que suele denominarse como "punto ciego" del ojo [20]. Su aspecto se presenta como una estructura circular u ovalada con bordes bien definidos; su color es más pálido que el de la retina circundante, ya que carece de las células fotosensibles (bastones y conos) presentes en el resto de la retina [21]. En cuanto a la función del disco óptico, se basa en la transmisión de la información visual; las fibras nerviosas de la retina convergen en el disco óptico para formar el nervio óptico, el cual transporta las señales visuales al cerebro. El cerebro interpreta estas señales y nos permite percibir los estímulos visuales. Dado a que el disco óptico no posee células fotorreceptoras, es un punto ciego en nuestro campo visual. Sin embargo, el ser humano no es consciente de este punto ciego debido a la capacidad del cerebro para completar la información faltante del otro ojo y del entorno visual circundante [20].

CAPÍTULO 2. MÉTODO

En este capítulo se describirán todos los conjuntos de imágenes de fondo de ojo que serán sometidos al proceso de filtrado y posteriormente al algoritmo utilizado para la localización del disco óptico. También se analizarán los diferentes parámetros dentro del algoritmo que serán los más adecuados para conseguir los mejores resultados de localización.

2.1. Conjuntos de imágenes

Para el procedimiento de la implementación, ejecución y aplicación del algoritmo de la detección del DO, es necesario trabajar sobre un variado número de conjunto de imágenes médicas patológicas que correspondan a exámenes de fondo de ojo. Estas imágenes serán sometidas primeramente a procesos de preprocesamiento y después de ese paso se aplicará el algoritmo de detección.

2.1.1. DIARETDB1: Base de datos estándar sobre retinopatía diabética (Standard Diabetic Retinopathy Database)

Es una base de datos pública utilizada para la evaluación médica comparativa de la detección de la retinopatía diabética a partir de imágenes digitales [22].

La base de datos consta de 89 imágenes de fondo de ojo a color. Según los expertos que participaron en la evaluación, dentro de este conjunto de imágenes, 84 contienen al menos signos leves no proliferativos (microaneurismas) de retinopatía diabética; 5 son consideradas normales (no contienen ningún signo de retinopatía diabética) [23]. Las imágenes se tomaron en el hospital universitario de Kuopio. Asimismo, las imágenes fueron elegidas por los expertos médicos, sin embargo, su distribución no corresponde a ningún tipo de población, los datos están sesgados y no se puede deducir ninguna información a priori a partir de ellos.

La Figura 9 muestra una porción de imágenes pertenecientes a DiaretDB1.

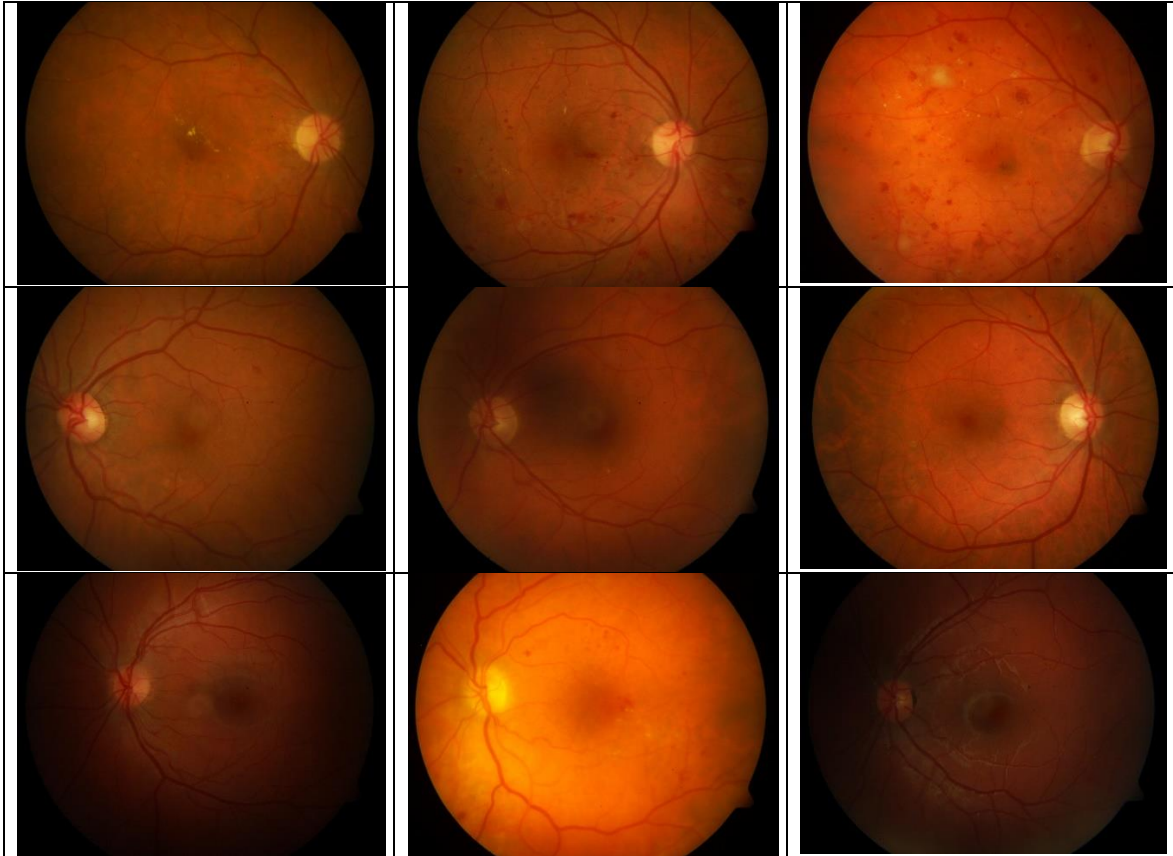


Figura 9 - Muestra de imágenes en DiaretDB1.

2.1.2. High-Resolution Fundus (HRF) Image Database

HRF es un conjunto de imágenes utilizada para la segmentación de vasos retinianos; está conformada por 45 imágenes y organizada en 15 subconjuntos [24]. Cada subconjunto contiene una imagen de fondo de ojo sano, una imagen de paciente con retinopatía diabética y una imagen con glaucoma. El tamaño de las imágenes es de 3.304 x 2.336 [24]. Esta base de datos fue creada por un grupo de investigación para apoyar estudios comparativos sobre algoritmos de segmentación automática en imágenes de fondo de ojo [25].

La siguiente Figura 10, nos muestra una parte de cómo está conformado el conjunto de imágenes HRF.



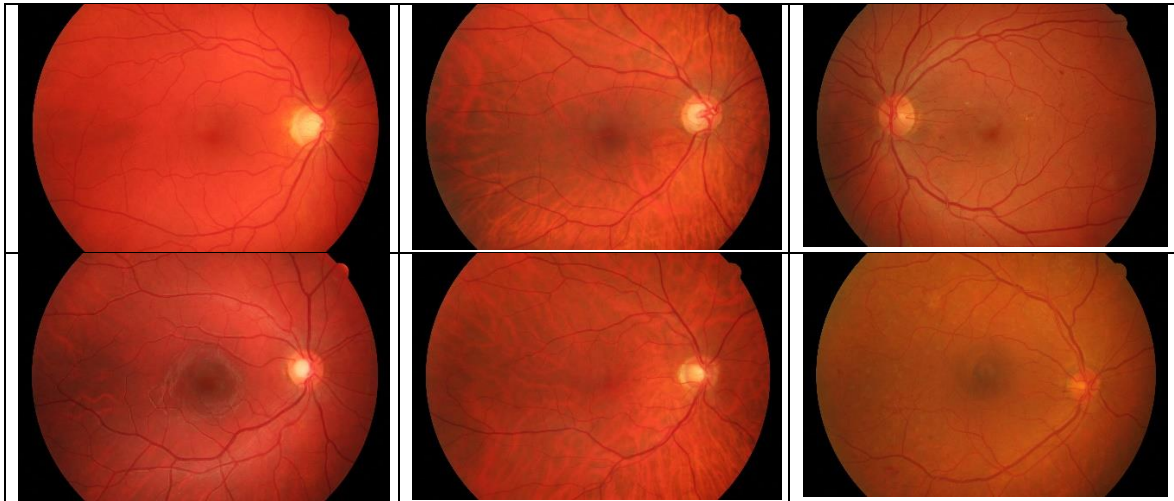


Figura 10 - Muestra de imágenes en HRF.

2.1.3. DRISHTI-GS1

Es un conjunto de imágenes destinado a validar la segmentación del DO y la copa [26]. Las imágenes de Drishti-GS fueron recopiladas por el hospital Aravind Eye de Madurai de la India [26]. Consta de un total de 101 imágenes, mismas que están divididas en 50 de entrenamiento y 51 de prueba. El conjunto de imágenes fue analizado por cuatro expertos en oftalmología. Los pacientes seleccionados con glaucoma tenían entre 40 y 80 años de edad y un número equivalente de hombres y mujeres sometidos a los exámenes [26]. Las imágenes se tomaron centradas en el DO con un campo de visión (FOV) de 30 grados, de dimensiones 2896 X 1944 píxeles y en formato de imagen PNG sin comprimir [26].

La Figura 11 muestra un subconjunto de imágenes pertenecientes a Drishti-GS.



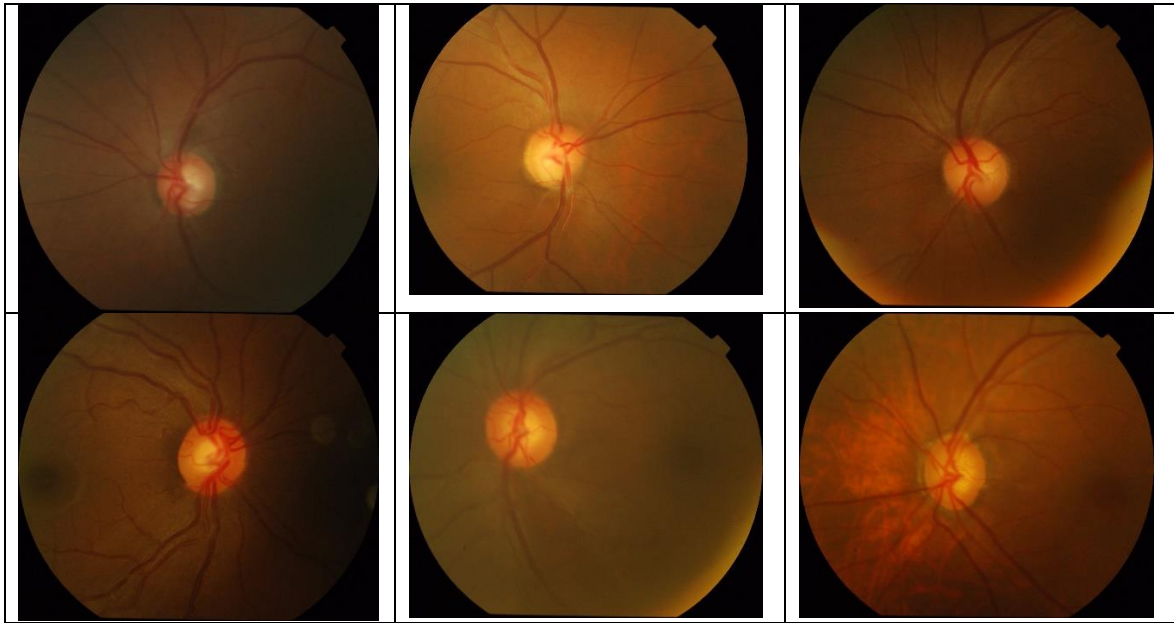


Figura 11 - Muestra de imágenes de DRISHTI-TEST.

2.1.4. Digital Retinal Images for Optic Nerve Segmentation Database DRIONS-DB

Es una base de datos pública que tiene como objetivo evaluar la segmentación del nervio óptico a partir de imágenes digitales de la retina [27] [28].

La base de datos está conformada por 110 imágenes digitales de retina a color.

La siguiente Tabla 1 muestra todas las características visuales vinculadas con problemas potenciales que podrían distorsionar el proceso de detección del contorno papilar para las 110 imágenes del conjunto de imágenes.

Tabla 1 - Características visuales de DRIONS.

| Característica visual | Número de imágenes |
|--|--------------------|
| Cataratas (graves o moderadas) | 0 |
| Artefactos luminosos | 3 |
| Parte del borde borroso o ausente | 5 |
| Atrofia peripapilar moderada | 16 |
| Atrofia peripapilar concéntrica/artefactos | 20 |
| Fuerte distracción de la palidez | 6 |

La edad media de los pacientes sometidos a los exámenes fue de 53 años. Este grupo de personas eran de etnia caucásica y de las cuales el 46,2% fueron hombres y el 53,8% mujeres [27] [28]. El 23,1% de los pacientes tenían glaucoma crónico simple y el 76,9% hipertensión ocular [27] [28]. Las imágenes fueron capturadas con una cámara de fondo de ojo analógica a color, aproximadamente centrada en el ONH (Hipoplasia del nervio óptico)

y fueron guardadas en formato diapositiva [27] [28]. La digitalización de las imágenes se realizó utilizando un escáner de alta resolución HP-PhotoSmart-S20, formato RGB, resolución 600x400 y 8 bits/píxel [27] [28].

La Figura 12 muestra un ejemplo con una porción de imágenes pertenecientes a DRIONS.

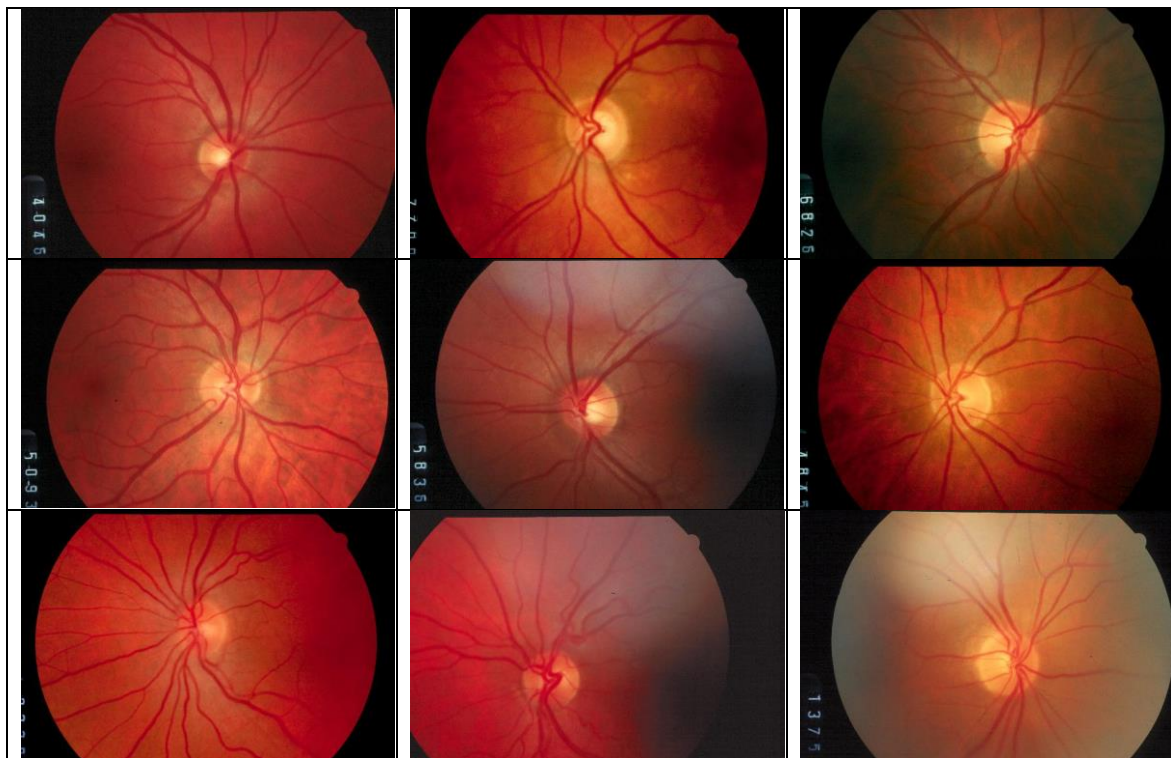


Figura 12 - Muestra de subconjunto de imágenes de DRIONS-DB

2.2. Filtros de preprocesamiento

Dentro del análisis de imágenes médicas, se requiere de forma mandatoria un proceso que aplique mejoramiento o preprocesamiento sobre ellas. Existe un amplio número de propuestas y estudios investigativos en los que el preprocesamiento logra descubrir regiones importantes en imágenes médicas, en ese caso regiones dentro del fondo de ojo. A su vez, este mejoramiento permite eliminar partes que podrían distorsionar un análisis y criterio médico a posteriori.

2.2.1. Implementación de filtros de preprocesamiento

Para el actual caso de estudio, se ha propuesto la aplicación los siguientes filtros en las imágenes de fondo de ojo:

- RGB to GRAY: Convierte la imagen en color real RGB en una imagen en escala de grises. La conversión a escala de grises elimina la información de tono y saturación y conserva la luminosidad al mismo tiempo [29].
- Mejora de la nitidez: La nitidez es el contraste entre diferentes colores. Una rápida transición del negro al blanco se ve con nitidez. Una transición gradual entre el negro al gris y al blanco se ve difusa. Mejorar la nitidez en las imágenes incrementa el contraste por los bordes en los que desembocan todos los diferentes colores [30].
- CLAHE: sus siglas en inglés Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (Ecuilización Adaptativa del Histograma con Contraste Limitado). Es una técnica de tratamiento de imágenes que se utiliza para mejorar el contraste de las estas, en particular las que tienen iluminación no uniforme [31]. CLAHE es una extensión de la ecualización por histograma que opera en pequeñas regiones de la imagen, en lugar de toda la imagen [32].

La implementación de estos filtros fue realizada en Matlab. El proceso de mejoramiento en cada imagen de fondo de ojo consiste en crear un programa en el que se aplique filtramiento por cada una de ellas en todo el conjunto de imágenes. La primera aplicación de filtramiento consiste en la conversión a escala de grises de la imagen original del fondo de ojo (a la que no se ha aplicado ningún proceso de mejora). Luego se aplica el filtro “imsharpen” para mejorar la nitidez de la imagen ya convertida en escala de grises. Finalmente se aplica el filtro adapthisteq, el cual mejora el contraste de la imagen tras el filtro de mejoramiento de nitidez.

En las figuras 13 y 14 se visualiza el proceso de filtramiento por las que son sometidas cada una de las imágenes de fondo de ojo del conjunto de imágenes.



Figura 13 - Esquema de proceso completo de filtramiento de fondo de ojo.

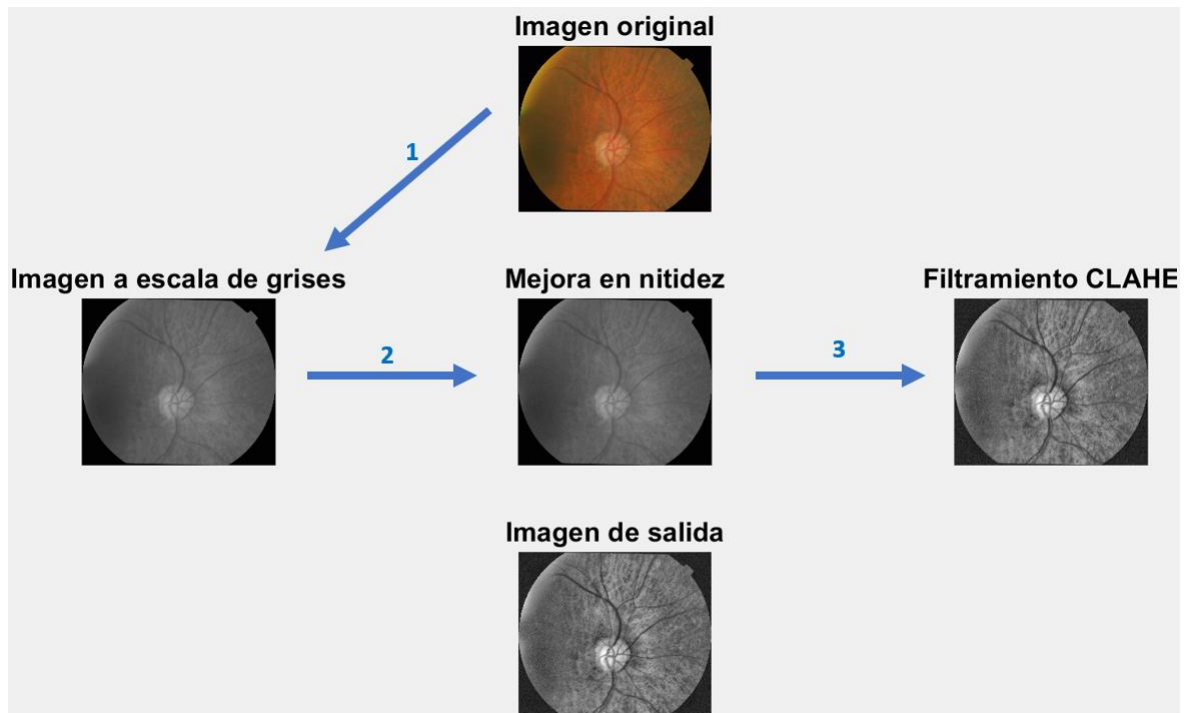


Figura 14 - Proceso de filtrado para una imagen en Drishti en Matlab.

2.3. Métrica cuantitativa

Una métrica cuantitativa es una medida expresada en términos numéricos, la cual permite una evaluación precisa y objetiva. Las métricas cuantitativas se utilizan en diversas disciplinas que permiten evaluar, cuantificar y obtener un seguimiento en distintos aspectos de sistemas, procesos, rendimiento o resultados. Estas métricas proporcionan una representación numérica clara de una característica concreta, lo que facilita el análisis y la toma de decisiones informadas.

2.3.1. Entropía

La entropía, dentro de la teoría de la información y juntamente con el estudio del tratamiento de imágenes, se caracteriza por ser una medida de la incertidumbre o el desorden en un conjunto de datos [33]. Concretamente cuantifica la cantidad media de información necesaria para describir el contenido de un mensaje o la incertidumbre asociada a una variable aleatoria.

Para una variable aleatoria discreta X con función de masa de probabilidad $P(x)$, la entropía de Shannon $H(x)$, se define como [34]:

$$H(X) = - \sum_i P(x_i) \cdot \log_2(P(x_i))$$

Donde la suma se aplica en todos los posibles valores x_i , de X . El logaritmo va en base 2, lo que provoca que la entropía se mida en bits [34].

Una entropía alta indica alta incertidumbre o desorden, mientras que una entropía baja indica baja incertidumbre o un sistema más predecible. La entropía máxima se produce cuando todos los resultados de una variable aleatoria son igualmente probables, y viene dada por $\log_2(\text{número de resultados})$ [33] [34]. Asimismo, el sistema en esta condición se encuentra en su estado más incierto. Por otra parte, la entropía mínima se genera cuando la distribución de probabilidad tiene un pico alto o está muy concentrada, y hay poca incertidumbre.

Así pues, en el campo de estudio del tratamiento de imágenes, la métrica puede aplicarse como medida de la cantidad de información o complejidad de esta. Finalmente, una entropía elevada puede indicar una imagen más compleja o detallada [33].

2.3.2. Implementación para métrica de entropía

La ejecución de la función de entropía será efectuada aplicándola sobre la imagen mejorada que se logra tras los tres pasos de filtramiento propuestos en la sección 2.2.1. Asimismo, cabe mencionar que la aplicación de la métrica de entropía se la realizará con la función *entropy* de Matlab.

2.4. Propuesta de detección del disco óptico

Para la resolución de la actual propuesta de investigación, se ha tomado de referencia el caso de estudio de [35]. Sobre este artículo de investigación se propone un método de detección del DO por medio del enfoque de ventana deslizante. Este enfoque permitiría localizar objetos dentro de una imagen, en este caso la zona del DO. La imagen de fondo de ojo filtrada será sometida a una división de regiones o sub-imágenes las cuales serán evaluadas por separado, es decir, se aplicará la métrica cuantitativa de entropía en cada región. Así, la región con la máxima puntuación será candidata a ser región de interés en la cual se encuentre localizado el DO [35]. Al mismo tiempo, la región del disco óptico generalmente es una zona muy brillante; si se aplica de primera mano la métrica de entropía, se podría detectar el DO en alguna región que se tenga la entropía más alta. Por el contrario, si no se lograra detectar la zona de interés, se aplicará un método alternativo de ventanas deslizantes que permitan encontrar a la región con más alta entropía y la localización del DO.

Las Figuras 15 y 16 muestran el resultado de la aplicación de las dos propuestas de detección según [35].

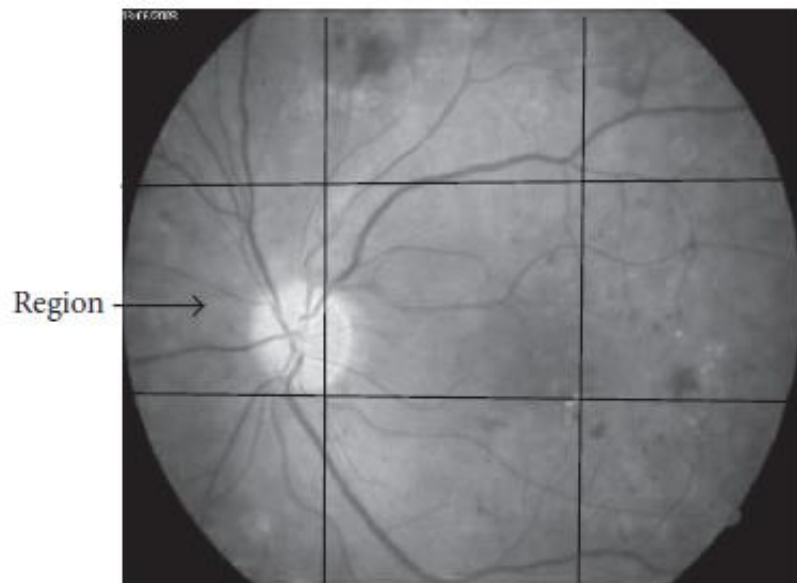


Figura 15 - División por regiones de 3x3 para aplicación de entropía por cada una de ellas [35].

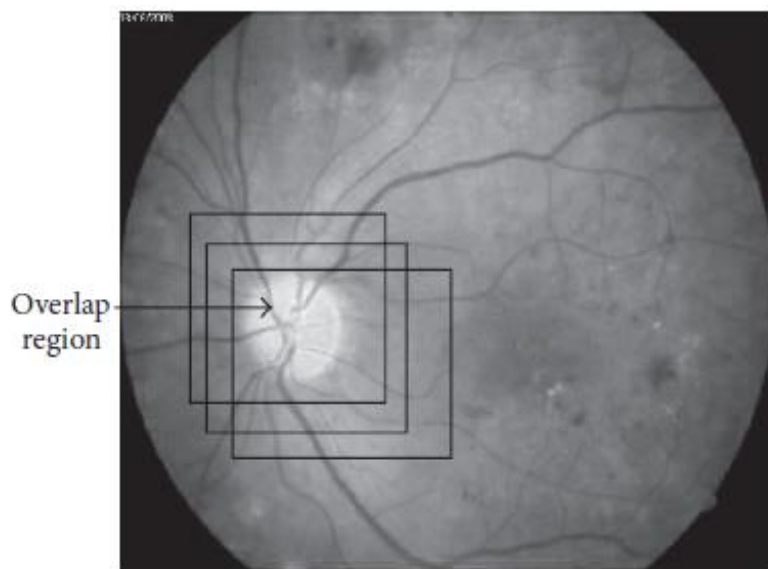


Figura 16 - Método alternativo de ventanas deslizantes para detección de DO [35].

Tras el análisis a fondo de esta propuesta, se formula una nueva aplicación que mejorará el proceso que conlleve a la localización del DO. Por lo tanto, se plantearán dos métodos de localización del DO basados en el estudio de [35].

2.4.1. Primera propuesta de detección de DO con entropía y ventanas deslizantes

La primera propuesta de detección pretende mejorar el algoritmo que tiene como origen el trabajo de [35].

El actual método está dividido en dos etapas:

- La etapa 1 se presenta cuando el DO se detectó en uno de los 9 bloques.
- La etapa 2 se presenta cuando el DO no fue detectado dentro de la etapa 1 y es necesario usar ventanas deslizantes.

Estas etapas serán descritas en este primer método de propuesta y son aplicadas en cada imagen de fondo de ojo.

El proceso de detección comenzará con la división de la imagen en 9 bloques, independientemente de la resolución que esta posea. Posteriormente, en cada bloque se procederá a aplicar la métrica de entropía. Cabe recalcar nuevamente que la aplicación de la métrica se realizará tras el proceso previo del esquema completo de filtramiento anteriormente propuesto en la sección 2.2.1. Una vez calculada la métrica en cada bloque, el algoritmo tomará el que tenga el valor de entropía más alto. Entonces, el bloque que posea el valor más alto de entropía será denominado, de ahora en adelante, como bloque candidato. Asimismo, dentro del bloque candidato estará localizado el DO. Finalmente, se dibujará un círculo sobre el DO; este círculo será trazado sobre la imagen original del fondo de ojo.

Un ejemplo de esta primera etapa de barrido se muestra en la siguiente Figura 17.

La imagen tomada en este caso y que fue sometida a pruebas de detección es identificada como “drishtiGS_023”, perteneciente a DRISHTI_TEST.

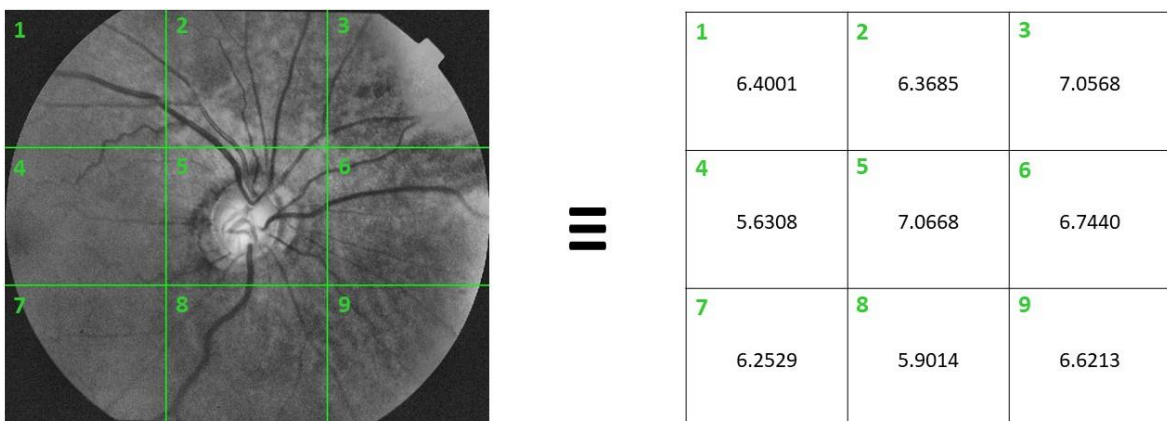


Figura 17 - Valores de entropía por cada bloque en drishtiGS_023.

Como se puede observar en la Figura 17, la imagen es dividida en nueve bloques, en cada bloque se calcula el valor de la entropía. De la misma forma, se puede observar que el

bloque candidato es el bloque número 5, el cual posee el mayor valor de entropía versus el resto bloques.

Una vez escogido el bloque 5, se dibujará un círculo sobre el contorno del DO. La Figura 18 muestra el resultado de la detección.



Figura 18 - Detección del DO tras primer barrido en drishtiGS_023.

Por otra parte, puede suscitarse el caso en el que el DO no sea detectado en alguno de los 9 bloques, es decir, que el DO pueda residir en dos bloques diferentes. Cuando ocurre esto, el algoritmo debe ejecutar una tarea adicional en la que se generen bloques o ventanas móviles deslizantes sobre estos dos bloques, aquí es donde la etapa 2 de detección comienza. Estas ventanas se moverán dentro de esas posibles regiones candidatas hasta encontrar el DO. La ventana deslizante con mayor entropía será recortada en esa parte de la imagen y se convertirá en el bloque candidato donde esté localizado el DO. Por último, una vez detectado el DO en el bloque candidato, se mostrará el bloque recortado con la detección para diferenciar la etapa 2 de la 1 de ese fondo de ojo. La Figura 19 muestra un bloque candidato recortado con el DO detectado en la imagen de 12_g del fondo de ojo perteneciente a HRF.



Figura 19 - DO localizado en bloque candidato tras aplicación de etapa 2 en 12_g de HRF.

Finalmente, se tomarán como casos de éxito de detección cuando el algoritmo logre encontrar un bloque candidato con el DO inscrito en este ya sea en la etapa 1 o 2. Por el contrario, los casos no exitosos de detección serán registrados cuando en las 2 etapas ejecutadas no se consiga localizar el DO en el bloque candidato resultante. Asimismo, el algoritmo almacenará por cada fondo de ojo una nueva imagen con el contorno circular de detección en el caso de la etapa 1 (tal cual se muestra en la Figura 18) o la imagen recortada con el bloque candidato en el caso de la etapa 2 (tal cual se muestra en la Figura 19). También almacenará la imagen cuando el DO no sea detectado.

2.4.2. Segunda propuesta de detección de DO con entropía y ventanas deslizantes

La segunda propuesta tiene algunos cambios respecto al método anteriormente expuesto en 2.4.1; la diferencia radica en que este método detecta al DO directamente en el bloque candidato sin separarlo en 2 etapas.

El algoritmo es aplicado sobre la imagen filtrada. La imagen filtrada es dividida en regiones o bloques de 3 x 3. Luego se calcula la métrica de entropía en cada región o bloque. Después de esto se ejecuta sobre la región con mayor entropía un nuevo posicionamiento de 5 ventanas deslizantes. Nuevamente se vuelve a calcular la entropía en cada ventana deslizante. Ahora, el bloque resultante o bloque candidato es elegido. Por otro lado, se convierte la imagen filtrada en binaria tras la selección del bloque candidato. Con la imagen binarizada, las mismas coordenadas del bloque candidato obtenido son usadas para localizar objetos amorfos, de ahora en adelante denominados blobs. El blob más grande es la representación binarizada del disco óptico. De igual manera, puede presentarse el caso de que el blob no esté en su totalidad dentro del bloque candidato; cuando sucede esto, se ejecuta una tarea de búsqueda de píxeles blancos que podrían formar parte del blob y va moviéndose a todas las direcciones hasta que no encuentre más píxeles blancos.

En la Figura 20, se muestra el proceso de búsqueda de píxeles blancos para completar el blob.

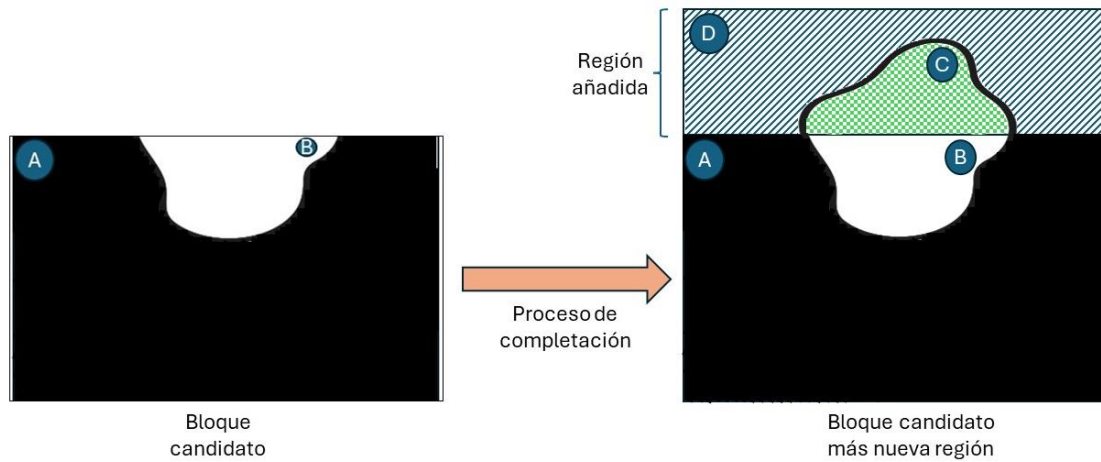


Figura 20 - Proceso resultante tras la completación de blob.

Dentro de la última Figura 20, se puede observar al bloque candidato conformado por la zona A y B. Asimismo, la zona B muestra una parte del blob (parte del DO). Luego, se aplica el proceso de completación, en el cual se añade una nueva región formada por la zona C y la zona D. La unión entre las zonas B y C forman el blob completo. Por último, la unión de las zonas A, B, C y D forman la nueva región o bloque que contiene al DO.

El proceso completo de localización del DO se muestra en la siguiente Figura 21:

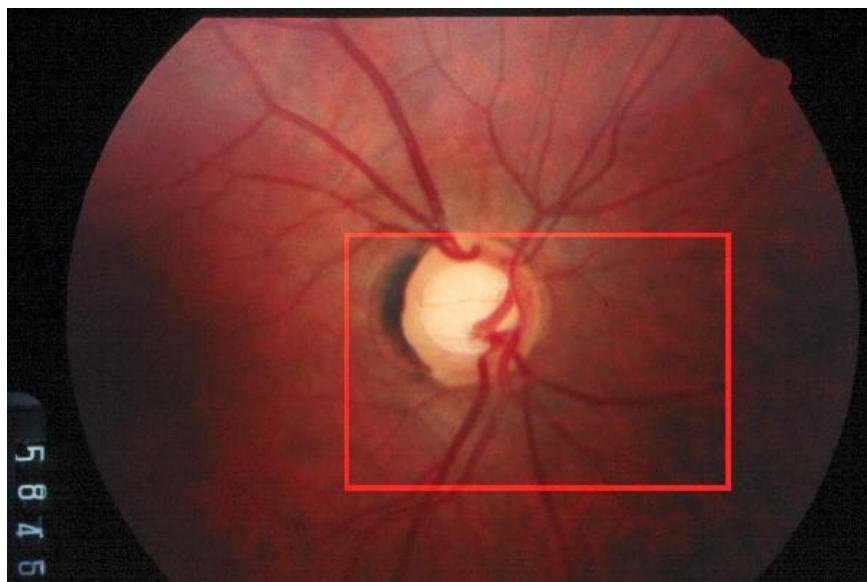


Figura 21- Bloque candidato y el DO detectado en DRIONS.

La imagen resultante, tras la finalización de la localización, incrusta un recuadro con el bloque que contiene al DO en la imagen original y es almacenada en un directorio. El proceso de almacenamiento culmina cuando se ha barrido la localización del DO en todas las imágenes.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se discutirán todos los resultados y valores obtenidos en la aplicación de la métrica para la detección del DO en imágenes de fondos de ojo. Estos resultados numéricos mostrarán la localización del DO en valores altos de entropía en bloques candidatos tras aplicación del algoritmo.

3.1. Conjuntos de imágenes aplicados en la detección de DO: Primera propuesta

Para la aplicación del algoritmo de detección de la propuesta planteada en la sección 2.4.1, se utilizarán las bases de datos de casos de fondos de ojo con alguna patología. Los conjuntos de imágenes son DiaretDB1, HRF, Drishti-GS, y DRIONS.

3.1.1. Resultados de localización de DO en Diaret-DB

El primer conjunto de imágenes a analizar es Diaret-DB. En todo el conjunto de imágenes se aplicaron los tres procesos de filtramiento y posteriormente los métodos propuestos de detección. Los resultados de la localización se muestran en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2 – Tasas de detección del DO en Diaret-DB.

| Nº de imágenes | Detección DO 1er barrido | Detección DO 2do barrido | No detección | Porcentaje detección % |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------|------------------------|
| 89 | 45 | 32 | 12 | 86,52 |

Como se puede observar en la tabla anterior, en todo el conjunto de imágenes se obtuvo un mayor número de detección del DO en el primer barrido. En el segundo barrido, tras la no localización del DO en el primer barrido, se obtuvo una cantidad de 32 localizaciones que complementan un total de tasa de éxito de detección del 86.52%. Por otro lado, 12 imágenes no pudieron ser detectadas tras la ejecución del algoritmo junto con sus dos etapas de detección.

Las Figuras 22, 23 y 24 muestran los resultados de detección del DO de la primera etapa de barrido, segunda etapa de barrido y la no detección respectivamente.

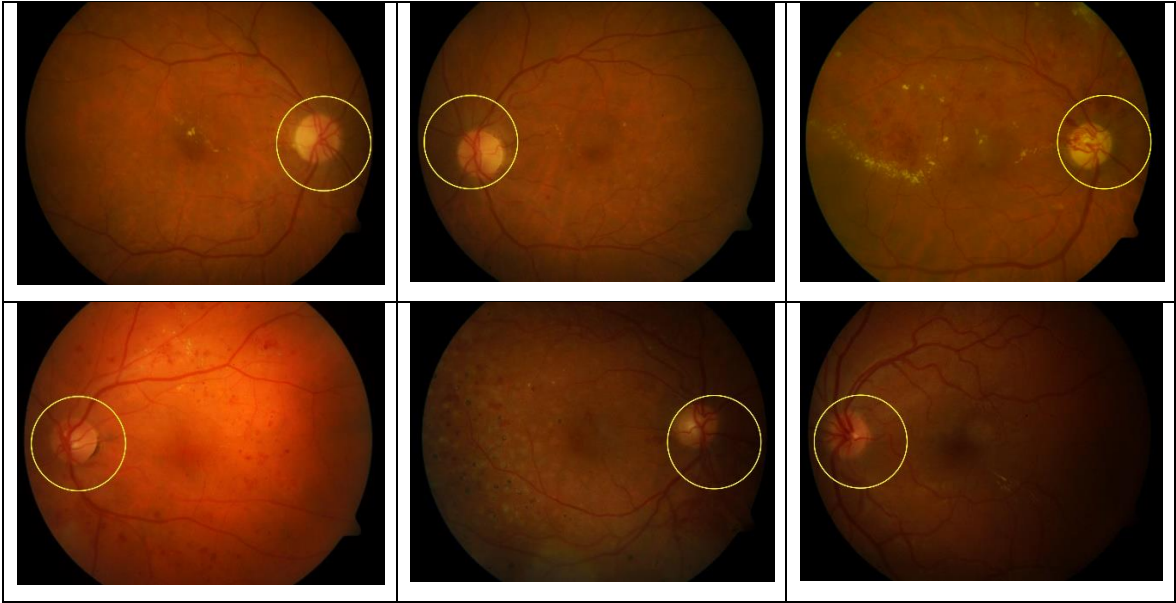


Figura 22 - Muestra de resultados de detección tras primera etapa de barrido en Diaret-DB.

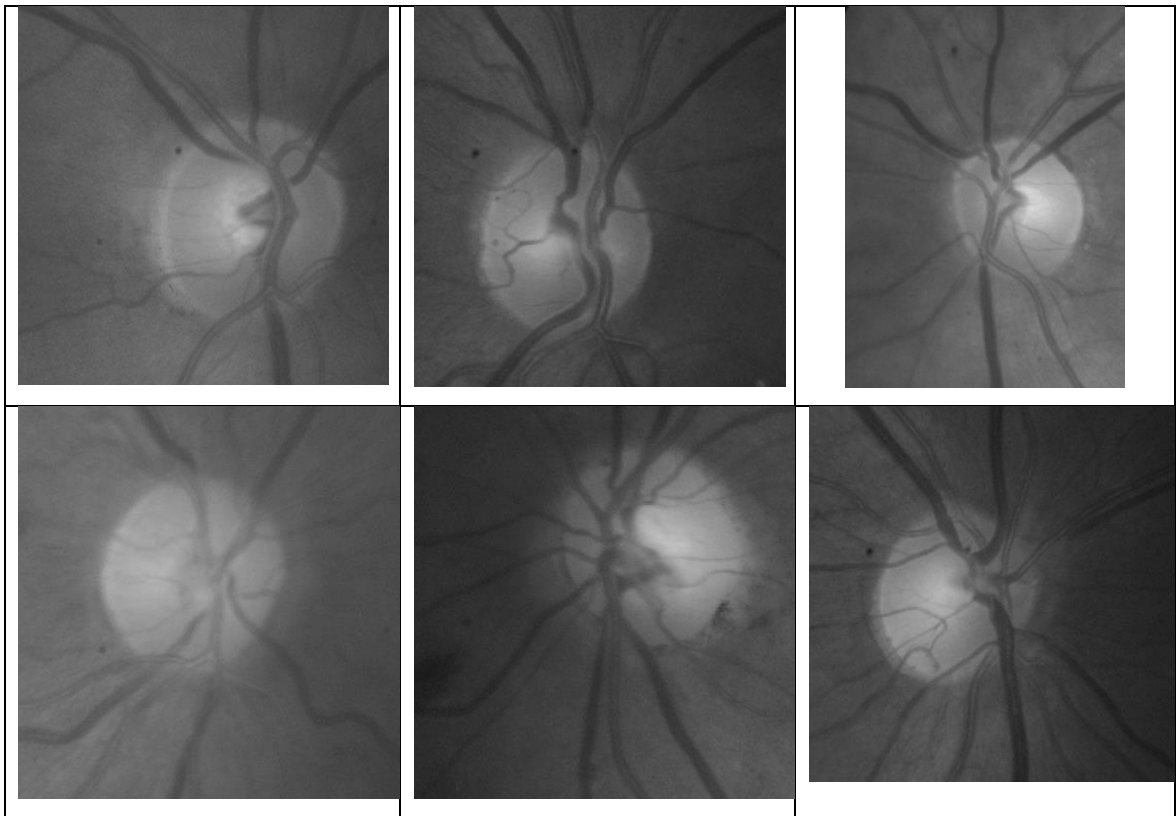


Figura 23 - Muestra de resultados de detección tras segunda etapa de barrido en Diaret-DB.

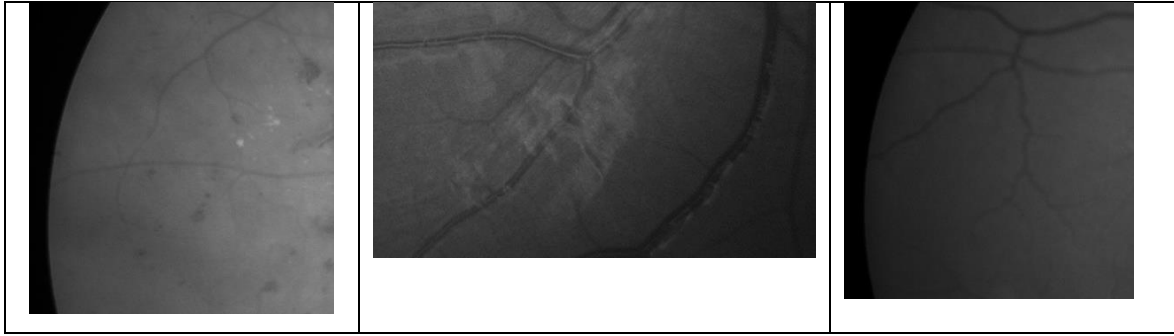


Figura 24 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en Diaret-DB.

Tras observar los resultados dentro de este conjunto de imágenes, se determina que las detecciones, tanto en la primera y segunda etapa de barridos, se lograron exitosamente ya que las zonas o bloques candidatos donde se localiza el DO tiene el mayor valor de entropía. Por el contrario, las zonas o bloques candidatos en los que no se detectó el DO, son bloques con mayor brillo, esto deriva en que los procesos de filtramiento propuestos no consiguieron aclarar la zona de interés, aclarándose otras zonas donde la entropía si es alta pero fuera del área del DO.

3.1.2. Resultados de localización de DO en HRF

El segundo conjunto de imágenes a analizar es HRF. Dentro de este, fueron aplicados los tres procesos de filtramiento y a continuación se ejecutó el algoritmo de localización del DO. Los resultados de la localización se muestran en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3 – Tasas de detección del DO en HRF.

| Nº de imágenes | Detección DO 1er barrido | Detección DO 2do barrido | Detección parcial | Porcentaje detección % |
|----------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|------------------------|
| 45 | 30 | 11 | 4 | 91,11 |

Como se puede observar en la tabla anterior, en todo el conjunto de imágenes se obtuvo un mayor número de localización del DO en la primera etapa barrido. En la segunda etapa del barrido, tras la no localización del DO en el primer barrido, se obtuvo una cantidad de 11 localizaciones que complementan un total de tasa de éxito de detección del 91.11%. Por otro lado, en 4 imágenes no se pudo localizar el DO del todo, ya que se localizó una porción de este en un bloque candidato tras la ejecución del algoritmo.

Las Figuras 25, 26 y 27 muestran los resultados de la localización del DO en la primera etapa de barrido, segunda etapa de barrido y la localización parcial respectivamente.

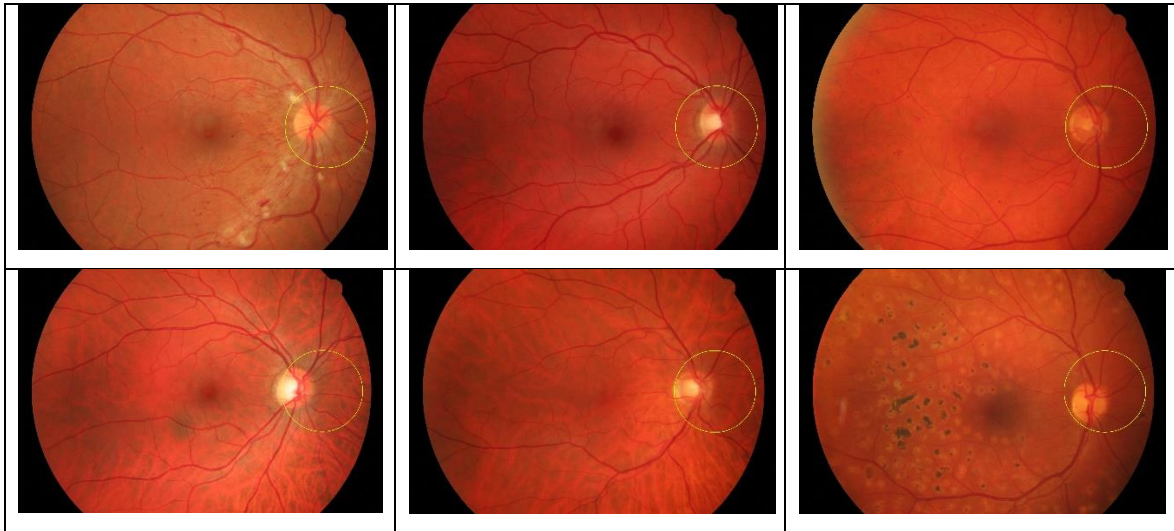


Figura 25 - Muestra de resultados de detección tras primera etapa de barrido en HRF.

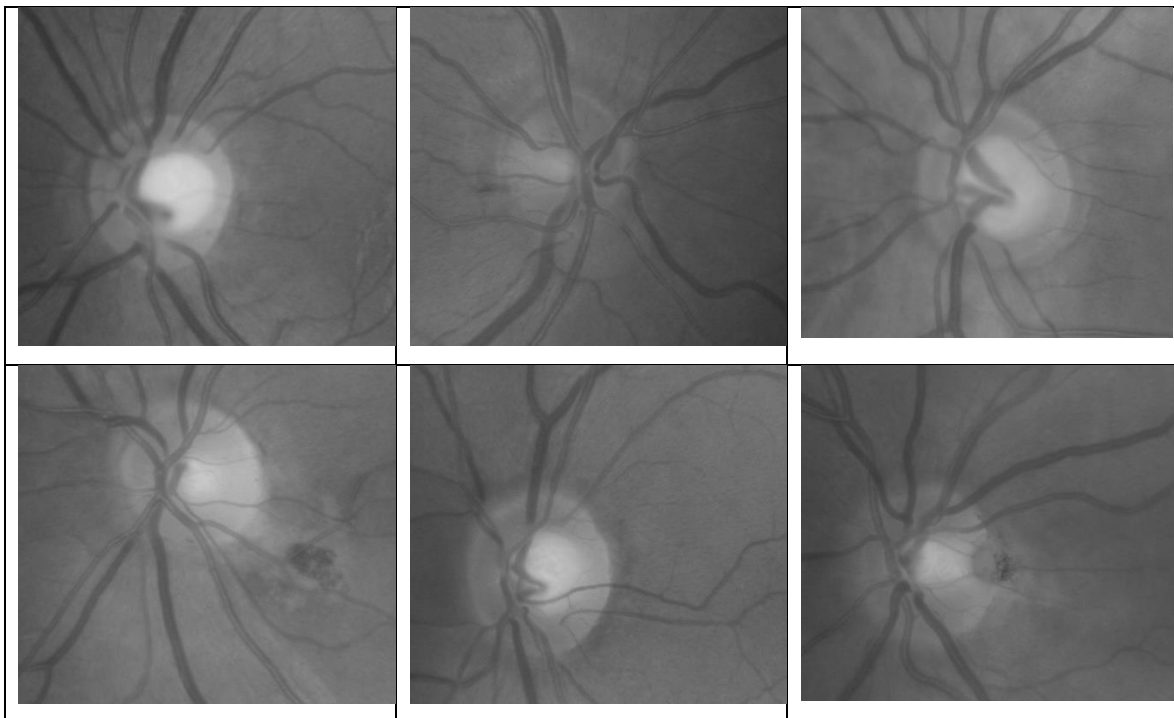


Figura 26 - Muestra de resultados de detección tras segunda etapa de barrido en HRF.



Figura 27 - Muestra de imágenes donde se detectó parcialmente el DO en HRF.

Tras observar los resultados en este conjunto de imágenes, se determina que, tanto en la primera y segunda etapa de barridos, se lograron exitosamente las localizaciones ya que las zonas o bloques candidatos donde se encontraba el DO tienen el mayor valor de entropía. Adicionalmente, las zonas o bloques candidatos en los que se localizó parcialmente el DO, son bloques con alto valor de entropía, pero el DO está dividido entre el bloque candidato de mayor valor y otro bloque contiguo, por lo que muestra solo una parte.

3.1.3. Resultados de localización de DO en Drishti-GS

El tercer conjunto de imágenes sometido a análisis es Drishti. El algoritmo fue aplicado en los conjuntos de imágenes, el de prueba y el de entrenamiento. Los resultados de la localización se muestran en la siguiente Tabla 4 y 5.

Tabla 4 – Tasas de detección del DO en Drishti-GS Training.

| Nº de imágenes | Detección DO 1er barrido | Detección DO 2do barrido | No detección | Porcentaje detección % |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------|------------------------|
| 50 | 37 | 10 | 3 | 94,00 |

Tabla 5 – Tasas de detección del DO en Drishti-GS Test.

| Nº de imágenes | Detección DO 1er barrido | Detección DO 2do barrido | No detección | Porcentaje detección % |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------|------------------------|
| 51 | 39 | 10 | 2 | 96,08 |

Los resultados de las tablas 4 y 5 reflejan una tasa de éxito muy alta con respecto a la localización del DO (mayor al 90%). Las localizaciones fallidas se suscitaron por zonas del fondo de ojo en las cuales se refleja un brillo mayor que no se origina en el DO, esto deriva a que los resultados de entropía sean altos en una zona no candidata.

Las Figuras 28 y 29 muestran los resultados de la localización del DO en la primera y segunda etapa de barrido del algoritmo en Drishti-GS Training. Asimismo, las Figuras 31 y 32 muestran los resultados de la localización del DO en la primera y segunda etapa de barrido del algoritmo en Drishti-GS Test. Por otra parte, en las Figuras 30 y 33 se muestran los casos en los que el algoritmo no pudo localizar el disco óptico en Drishti-GS Training y en Drishti-GS Test respectivamente.

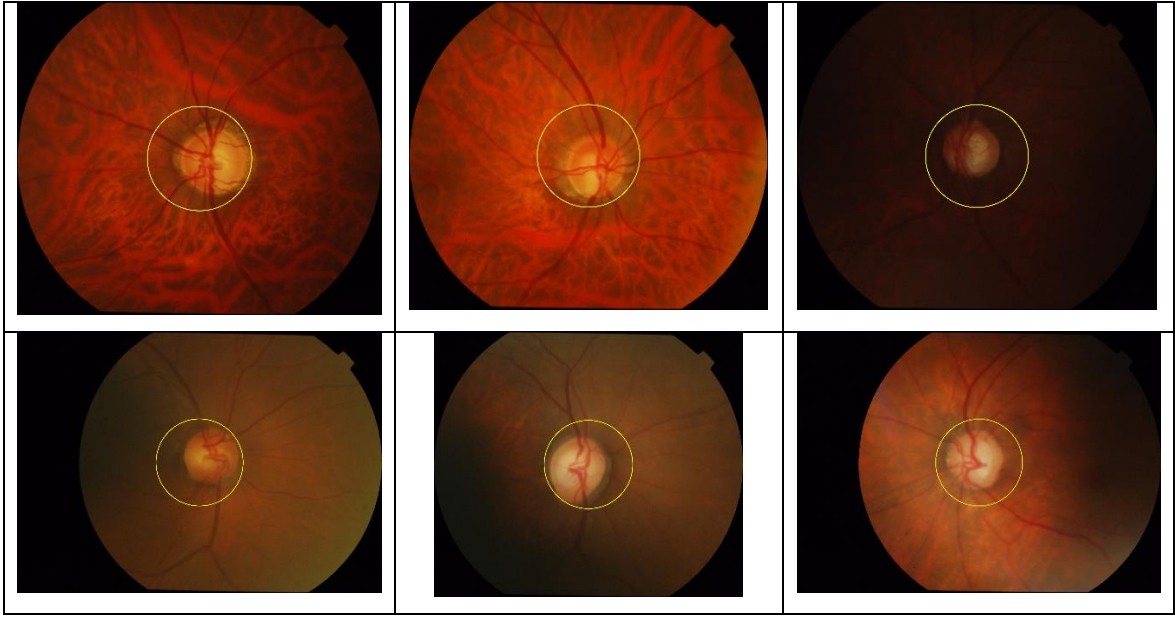


Figura 28- Muestra de resultados de detección tras primera etapa de barrido en Drishti-GS Training.

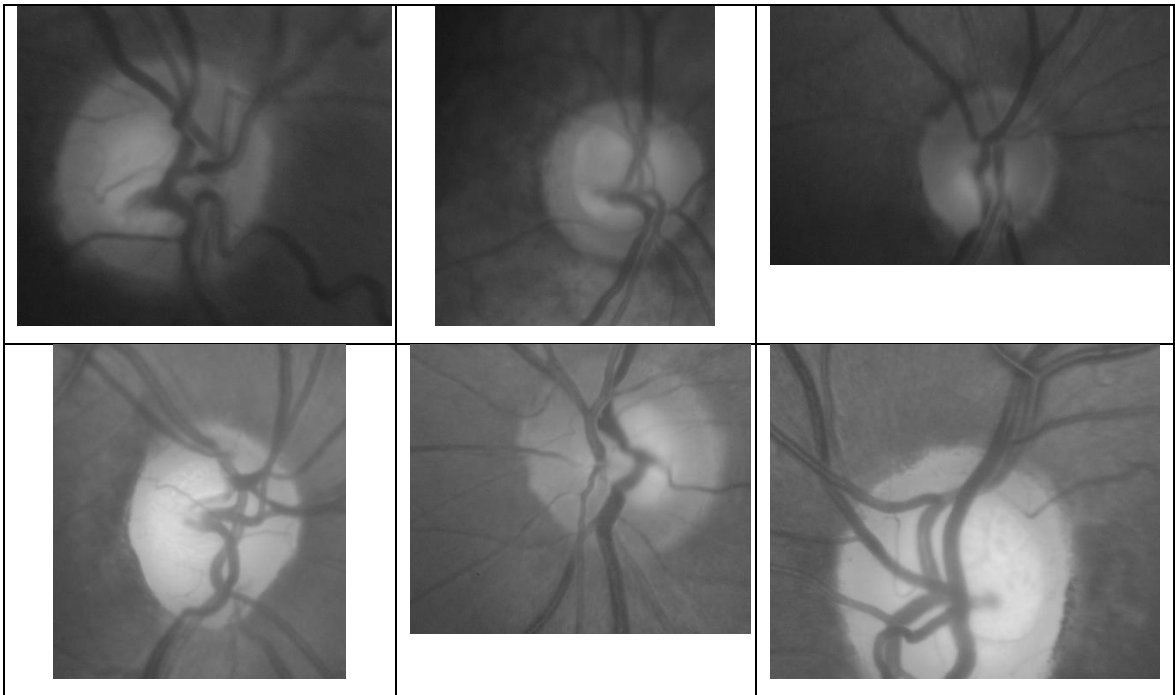


Figura 29 - Muestra de resultados de detección tras segunda etapa de barrido en Drishti-GS Training.

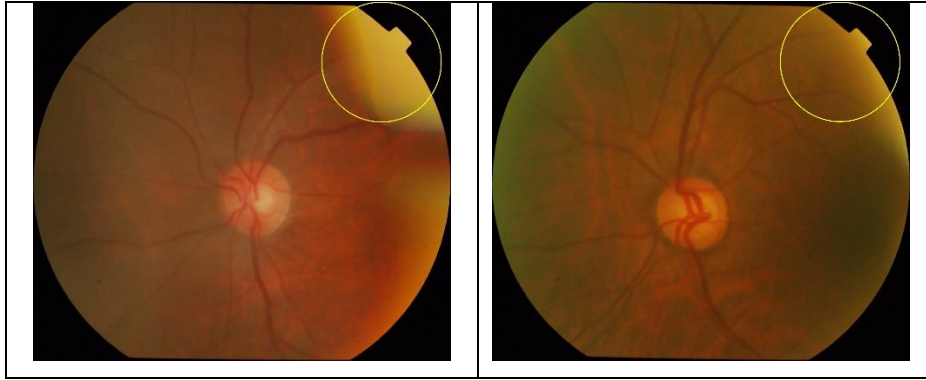


Figura 30 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en Drishti-GS Training.

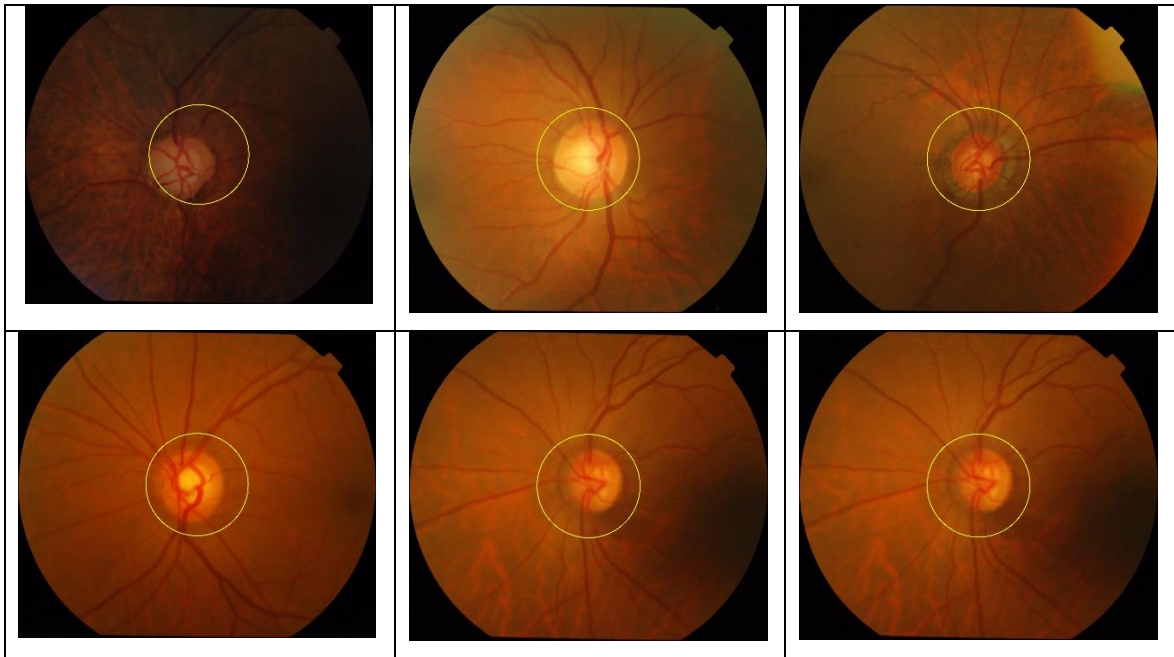


Figura 31 - Muestra de resultados de detección tras primera etapa de barrido en Drishti-GS Test.





Figura 32 - Muestra de resultados de detección tras segunda etapa de barrido en Drishti-GS Test.

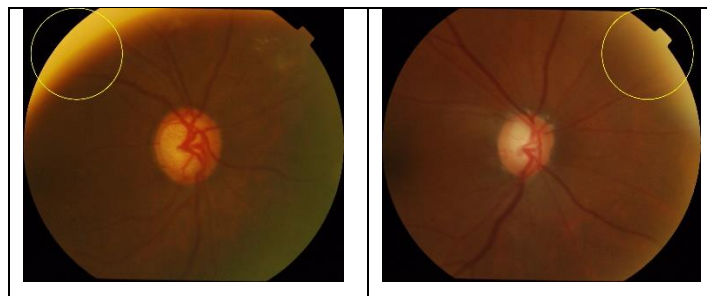


Figura 33 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en Drishti-GS Test.

Tras observar los resultados obtenidos, tanto en el conjunto de imágenes de prueba como en el de entrenamiento, se lograron tasas de éxito superiores al 90% en la localización del DO para los dos casos. En otras palabras, el valor de entropía más alto conseguido fue en el bloque candidato donde se encontraba el DO. Por el contrario, se obtuvieron muy pocos casos de no localización del DO en los dos conjuntos de imágenes. Esto se produjo en las imágenes de fondo de ojo que presentaban dentro de ellas zonas muy brillantes en partes diferentes a la zona de interés, derivando que el valor de entropía alto apunte a esas regiones.

3.1.4. Resultados de localización de DO en DRIONS

El cuarto conjunto de imágenes, Drions, es el último conjunto por analizar. El algoritmo fue aplicado a lo largo del mismo y sus resultados de localización se muestran en la siguiente Tabla 6.

Tabla 6 - Tasas de detección del DO en Drions.

| N° de imágenes | Detección DO 1er barrido | Detección DO 2do barrido | Detección parcial | No detección | Porcentaje detección % |
|----------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|--------------|------------------------|
| 110 | 58 | 41 | 5 | 6 | 90 |

Los resultados mostrados en la tabla anterior indican una tasa de éxito de localización del DO igual al 90%. Al mismo tiempo, se reportaron casos de localizaciones parciales, en las cuales el círculo que rodea la parte del DO no revela la localización completa del mismo.

Las no localizaciones del DO se presentaron tras la ejecución del algoritmo en su segunda etapa del barrido, marcando un valor alto de entropía en una zona no candidata.

Las Figuras 34 y 35 muestran los resultados de las localizaciones del DO en la primera y segunda etapa de barrido. Asimismo, la Figura 36 muestra los casos particulares de localizaciones parciales del DO. Finalmente, la Figura 37 muestra los casos en el que el algoritmo no logró localizar el DO.



Figura 34 - Muestra de resultados de localización tras primera etapa de barrido en Drions.

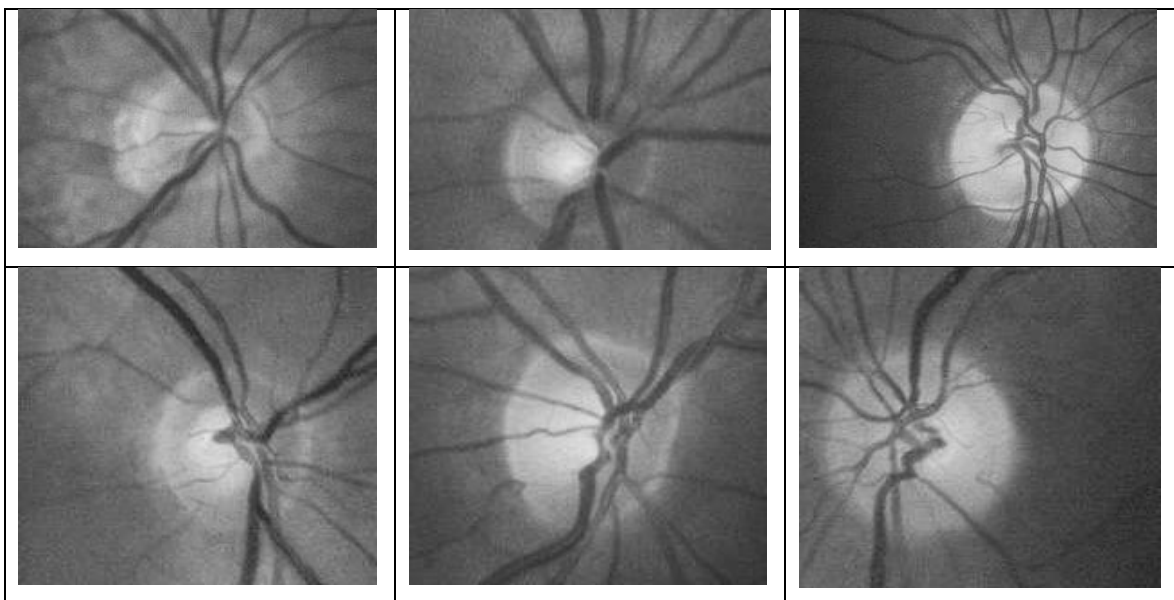


Figura 35 - Muestra de resultados de localización tras segunda etapa de barrido en Drions.



Figura 36 - Muestra de imágenes donde se localizó parcialmente el DO en Drions.



Figura 37 - Muestra de imágenes donde no se localizó el DO en Drions.

3.2. Conjuntos de imágenes aplicados en la detección de DO: Segunda propuesta

En esta sección, se expondrán los resultados obtenidos tras la aplicación del algoritmo de localización en la segunda propuesta planteada en la sección 2.4.2. De forma similar, se utilizarán las bases de datos de fondos de ojo con alguna patología. Las localizaciones del DO serán clasificadas como:

- Detectadas cuando el bloque candidato haya localizado el DO de forma total (cuando todo el DO está dentro del bloque candidato).
- Cuando haya sido detectado de forma parcial (cuando parte del DO está parcialmente dentro del bloque candidato).
- No localizado, cuando el bloque candidato esté marcándose donde no está el DO.

Finalmente, los resultados conseguidos bajo la actual propuesta se mostrarán en las siguientes subsecciones.

3.2.1. Resultados de localización de DO en Diaret-DB

El conjunto de imágenes a ser analizado es Diaret-DB. Como en el resto de las pruebas realizadas, se aplicaron procesos de filtramiento tal cual se plantearon en la sección 2.2.1.

Los resultados de la localización en base al número de imágenes y sus porcentajes se muestran en las siguientes Tablas 7 y 8.

Tabla 7 – Número de imágenes con localización y no localización del DO en Diaret-DB.

| N° de imágenes | Detección DO | | No detección DO |
|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 89 | 79 | | 10 |
| | Detección total | Detección parcial | |
| | 67 | 12 | |

Tabla 8 – Tasas de detección del DO en Diaret-DB.

| N° de imágenes | Detección DO % | | No detección DO % |
|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 89 | 88,76 | | 11,24 |
| | Detección total % | Detección parcial % | |
| | 84,81 | 15,19 | |

Como se puede observar en la Tabla 8, en todo el conjunto de imágenes se obtuvo una cantidad de 79 imágenes con detecciones del disco óptico con un porcentaje de detección del 88.76%. En relación con este resultado, es necesario recalcar que el 84.81% de las detecciones fueron detecciones completas o totales, es decir, el DO está dentro del bloque candidato. Asimismo, el 15.19% fueron detecciones parciales, es decir, solo una porción del DO estaba dentro del bloque candidato. No obstante, en 10 imágenes no se logró la detección del DO.

Las Figuras 38, 39 y 40 muestran los resultados de localización del DO totales, parciales y las no detecciones en Diaret-DB.

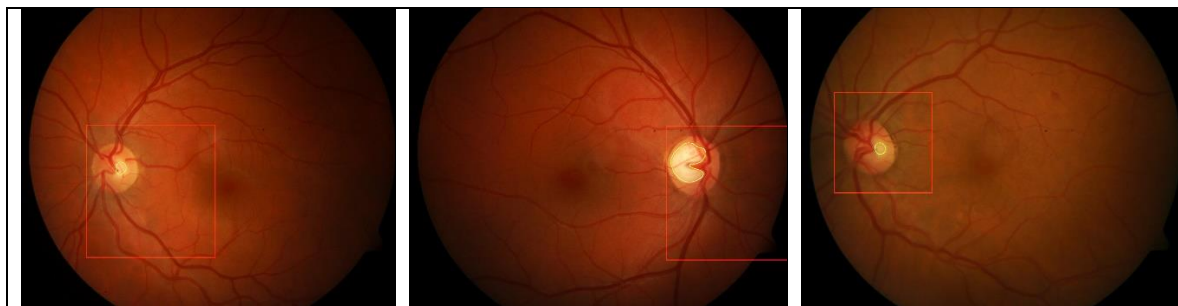


Figura 38 - Muestra de resultados de detección completa del DO en Diaret-DB.

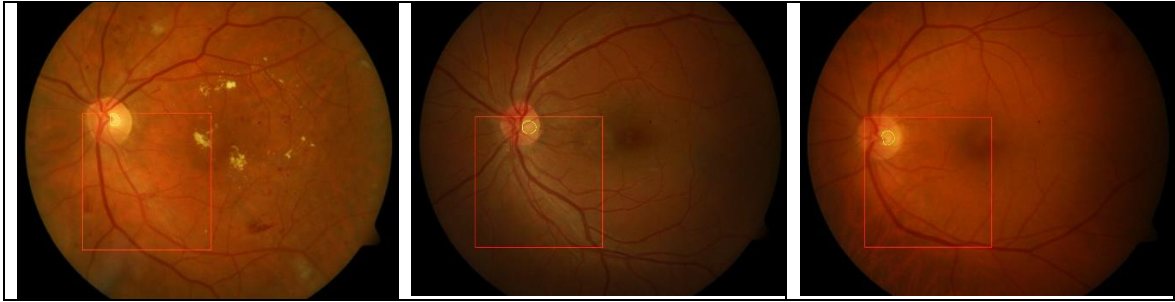


Figura 39 – Muestra de resultados de detección parcial del DO en Diaret-DB.



Figura 40 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en Diaret-DB.

Tras observar los resultados, se determinó que las detecciones se lograron exitosamente ya que en los bloques candidatos se localiza el DO. Asimismo, dentro del bloque candidato, se tiene el mayor valor de entropía. Por otro lado, los bloques candidatos en los que no se detectó el DO, son zonas con mayor brillo. Por lo que, a pesar de la aplicación de los procesos de filtramiento propuestos, no se logró aclarar la parte en donde se encuentra el DO y se mostraron otras zonas donde la entropía si es alta pero que no está dentro del área de interés.

3.2.2. Resultados de localización de DO en HRF

El conjunto de imágenes a analizar ahora es HRF. Los resultados de la detección para este conjunto de imágenes se muestran a continuación en las siguientes Tabla 9 y 10.

Tabla 9 – Número de imágenes con detección completa, parcial y no detección del DO en HRF.

| N° de imágenes | Detección DO | | No detección DO |
|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | 43 | | |
| 45 | Detección total | Detección parcial | |
| | 38 | 5 | |

Tabla 10 – Tasas de detección del DO en HRF.

| N° de imágenes | Detección DO % | No detección DO % |
|----------------|----------------|-------------------|
| | | |

| | | | |
|----|----------------------|------------------------|------|
| 45 | 95,56 | | 4,44 |
| | Detección total % | Detección parcial % | |
| | 88,37 | 11,63 | |

La Tabla 10 muestra un 95.56% de detecciones, de las cuales el 88,37% del total de 43 imágenes detectaron el DO en su totalidad. Asimismo, un 11.63% fueron detecciones parciales del DO en la cual una porción de este estaba dentro del bloque candidato. Por otra parte, en 2 imágenes no se localizó el DO dentro del bloque candidato.

Las Figuras 41, 42 y 43 muestran los resultados obtenidos para las detecciones completas del DO, parciales y no detecciones respectivamente.

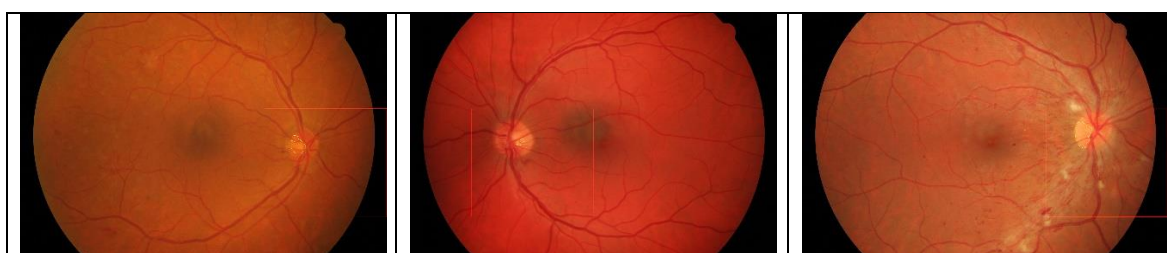


Figura 41 - Muestra de resultados de detecciones totales o completas del DO en HRF.



Figura 42 - Muestra de detección parcial del DO en HRF.

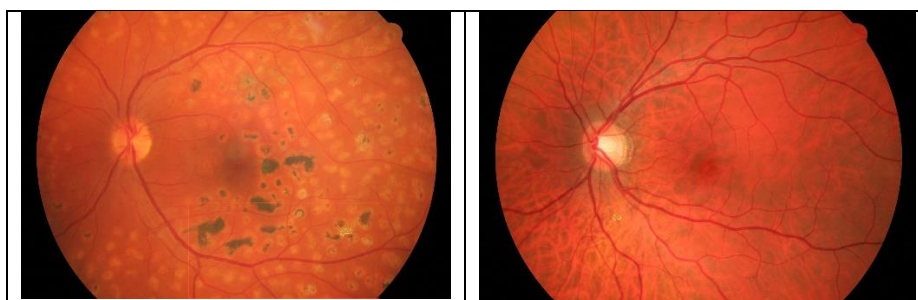


Figura 43 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en HRF.

Los resultados logrados en este conjunto de imágenes muestran que en la mayoría de las imágenes se lograron detecciones del DO. Sin embargo, el 11.63% fueron localizaciones parciales, esto deriva en que la entropía de ese bloque candidato efectivamente es alta pero el algoritmo no logró recorrer el bloque candidato para el cometido de localización completa del DO. Finalmente, en solo 2 imágenes no se logró detectar el DO; esto

representa un porcentaje pequeño versus los otros resultados y deriva en que el comportamiento del método de detección dentro de este conjunto de imágenes fue exitoso.

3.2.3. Resultados de localización de DO en Drishti-GS

El tercer conjunto de imágenes a analizar es Drishti-GS. El algoritmo fue aplicado en los dos conjuntos de imágenes, el de prueba y el de entrenamiento.

Los resultados de la localización se muestran en las siguientes Tabla 11 y 12 para Drishti-GS–Training.

Tabla 11 – Número de imágenes con detecciones del DO en Drishti-GS Training.

| N° de imágenes | Detección DO | | No detección DO |
|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 50 | 49 | | 1 |
| | Detección total | Detección parcial | |
| | 45 | 4 | |

Tabla 12 – Porcentajes de detección del DO en Drishti-GS Training.

| N° de imágenes | Detección DO % | | No detección DO % |
|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 50 | 98,00 | | 2,00 |
| | Detección total % | Detección parcial % | |
| | 91,84 | 8,16 | |

En las 50 imágenes sometidas al algoritmo de detección, 49 de ellas estuvieron en la categoría de detección del DO. Asimismo, el 91,84% de las imágenes responden a la detección del DO completo dentro del bloque candidato. El bloque candidato dentro de la detección total obtuvo resultados altos de entropía en las zonas donde se encontraba el DO. El 8,16% de las 49 imágenes logró una detección parcial del DO; el algoritmo no logró detectar dentro del bloque candidato la completitud del DO, siendo este bloque el de más alta entropía. Por otra parte, se obtuvo una tasa del 2% en imágenes en las que no se detectó el DO; en estas imágenes el bloque candidato marcó una zona donde el DO no se encontraba, siendo esa zona la de más alta entropía igualmente, pero sin éxito en la detección.

Las Figuras 44, 45 y 46 muestran los resultados obtenidos de detección completa, parcial y no detección del DO respectivamente en el conjunto de imágenes Drishti-GS–Training.



Figura 44- Muestra de imágenes de detección completa del DO en Drishti-GS Training.

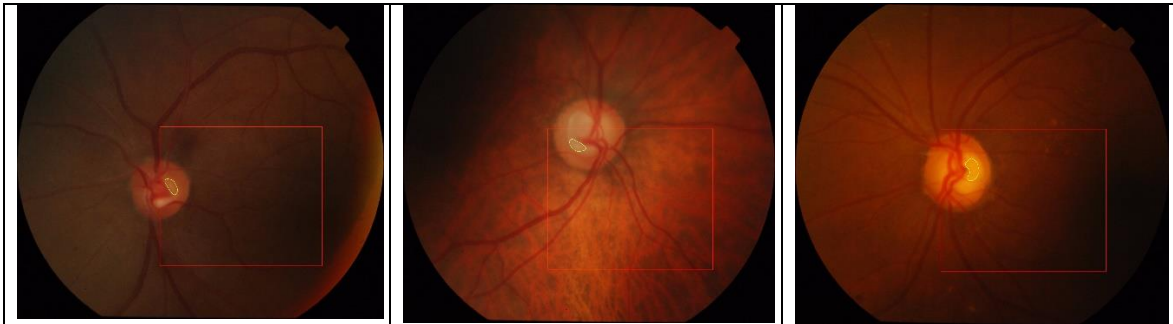


Figura 45 - Muestra de imágenes donde se detectó parcialmente el DO en Drishti-GS Training.



Figura 46 - Muestra de imagen donde no se detectó el DO en Drishti-GS Training.

Para el caso del conjunto de imágenes Drishti-GS-Test, se muestran los resultados obtenidos de las detecciones en las Tablas 13 y 14.

Tabla 13 – Número de imágenes de detecciones del DO en Drishti-GS Test.

| N° de imágenes | Detección DO | | No detección DO |
|-----------------|--------------|-------------------|-----------------|
| | 51 | 50 | |
| Detección total | | Detección parcial | |
| 42 | | 8 | |

Tabla 14 – Porcentajes en detecciones del DO en Drishti-GS Test.

| N° de imágenes | Detección DO % | | No detección DO % |
|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| | 98,04 | | |
| 51 | Detección total % | Detección parcial % | 1,96 |
| | 84,00 | 16,00 | |

Los resultados mostrados en las dos últimas tablas reflejan una tasa de éxito muy alta de detección del DO con un total del 98.04% de detecciones del DO. Igualmente, de las 50 imágenes con detección, el 84% de ellas tuvo éxito con la detección completa del DO; el bloque candidato logró detectar el DO en su totalidad. Así pues, el 16% de las 50 imágenes no consiguieron detectar en su totalidad el DO y solo lo ubicaron parcialmente. Finalmente, el 1.96% de las imágenes no pudieron detectar el DO.

Las Figuras 47, 48, y 49 muestran los resultados obtenidos para la detección completa del DO, detección parcial y no detección del DO respectivamente.



Figura 47 - Muestra de imágenes de detección completa del DO en Drishti-GS Test.



Figura 48 - Muestra de imágenes en las que se detectó parcialmente el DO en Drishti-GS Test.



Figura 49 - Muestra de imagen donde no se detectó el DO en Drishti-GS Test.

Completando el análisis de los resultados presentados para este conjunto de imágenes, se puede concluir que el método de detección fue exitoso. Por lo que se refiere a la tasa de detección completa del DO, se obtuvo una efectividad de detección en 42 de las 51 imágenes estudiadas. Adicionalmente, los bloques candidatos de las 42 imágenes resultaron con el mayor valor de entropía, cumpliendo exitosamente con la propuesta de detección del DO completo en zonas con mayor valor de entropía. Igualmente, el comportamiento del algoritmo tuvo el caso de no detección del DO en tan solo una sola imagen del conjunto de imágenes, esto se presentó por un caso de mayor brillo en el fondo de ojo donde una parte de esta tenía el mayor valor de entropía y el bloque candidato la escogió.

3.2.4. Resultados de localización de DO en DRIONS

El último conjunto de imágenes a ser analizado es Drions. El algoritmo fue aplicado a lo largo del mismo y sus resultados de detección se muestran en las siguientes Tablas 15 y 16.

Tabla 15 – Cantidad de imágenes con detección y no detección del DO en Drions.

| N° de imágenes | Detección DO | | No detección DO |
|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 110 | 99 | | 11 |
| | Detección total | Detección parcial | |
| | 87 | 12 | |

Tabla 16 – Porcentajes de detección del DO en Drions.

| N° de imágenes | Detección DO % | | No detección DO % |
|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 110 | 90,00 | | 10,00 |
| | Detección total % | Detección parcial % | |
| | 87,88 | 12,12 | |

En las 110 imágenes, se obtuvo un porcentaje del 90% de detección completa y parcial del DO. Asimismo, el 87.88% fueron detecciones completas del DO, siendo estas ubicadas exitosamente dentro del bloque candidato. Doce imágenes tuvieron detecciones parciales del DO. Por otro parte, el 10% de la totalidad del conjunto de imágenes tras aplicación de algoritmo no tuvo éxito en la detección el DO.

Para poder observar de una forma más amplia las detecciones del DO, se plantean las Figuras 50, 51 y 52 en donde se muestran los resultados conseguidos de la detección del DO completo, parcial y no detección respectivamente.



Figura 50 - Muestra de imágenes de detección completa del DO en Drions.



Figura 51 - Muestra de imágenes en las que se detectó parcialmente el DO en Drions.

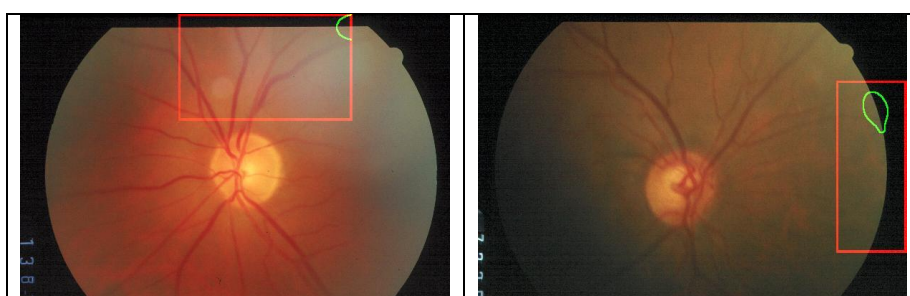


Figura 52 - Muestra de imágenes donde no se detectó el DO en Drions.

En cuanto al conjunto de imágenes Drions, como se puede observar en las últimas tres Figuras, las letras presentes en los fondos de ojo no alteraron en este caso el proceso de detección. Los bloques candidatos tuvieron un éxito de localización del DO en 87 de las 110 imágenes del conjunto de imágenes y que al mismo tiempo se confirmó una vez más que en ese bloque resultante la entropía tuvo un valor alto dentro de la zona de interés. Por el contrario, los procesos de filtramiento planteados no lograron en su totalidad mejorar

las zonas brillantes donde se requiere detectar el DO y por esto se obtuvo un 10 % de no detección.

3.3. Análisis general de las detecciones de DO en los conjuntos de imágenes estudiados

Dentro de esta sección, se analizarán los resultados conseguidos tras la ejecución del algoritmo de detección de los dos métodos planteados anteriormente. La evaluación general de los resultados en todos los conjuntos de imágenes sometidos a localización del DO permitirá validar los porcentajes de éxito del algoritmo en conjunto con todas las imágenes y nos revelará que tan exitosa fue su aplicación.

3.3.1. Resultados totales obtenidos con el primer método de detección

La ejecución del primer método dentro de los cinco conjuntos de imágenes propuestos entregó una tasa de localización del DO promedio del 91.54%. Esta tasa es considerada tras descartar las imágenes en las que se detectó parcialmente el DO, es decir, en las que el DO no estaba dentro del bloque candidato y las no detecciones de este. La Tabla 17 muestra el conteo de imágenes con detección en las dos etapas de barrido de detección.

Tabla 17 - Resultados totales de detecciones, detecciones parciales y no detecciones por cada conjunto de imágenes.

| Conjunto de Imágenes | Detección DO 1er barrido | Detección DO 2do barrido | Detección parcial DO | No detección |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|
| <i>DIARETDB</i> | 45 | 32 | 0 | 12 |
| <i>HRF</i> | 30 | 11 | 4 | 0 |
| <i>Drishti-GS Training</i> | 37 | 10 | 0 | 3 |
| <i>Drishti-GS Test</i> | 39 | 10 | 0 | 2 |
| <i>Drions</i> | 58 | 41 | 5 | 6 |
| TOTAL IMÁGENES | 209 | 104 | 9 | 23 |

Al mismo tiempo, se resume en su totalidad las detecciones, detecciones parciales y no detecciones del DO en la Tabla 18.

Tabla 18 – Resultados totales de detección obtenidos en conjuntos de imágenes propuestos.

| CONJUNTOS ANALIZADOS | DO LOCALIZADOS EN CONJUNTOS | DETECCIÓN PARCIAL DO EN CONJUNTOS DE IMÁGENES | NO DETECCIÓN DEL DO |
|----------------------|-----------------------------|---|---------------------|
| 5 | 313 | 9 | 23 |

Finalmente, en términos porcentuales, se propone la Tabla 19 en la cual se muestra el promedio general de las detecciones del DO en todo el conjunto de imágenes sometidos a los algoritmos del primer método. Los resultados totales de este método también se ven sustentados en la Figura 53.

Tabla 19 – Porcentaje promedio de detección del DO en conjuntos de imágenes propuestos.

| CONJUNTOS DE IMÁGENES | PORCENTAJE DETECCIÓN % |
|----------------------------|------------------------|
| <i>DIARETDB</i> | 86,52 |
| <i>HRF</i> | 91,11 |
| <i>Drishti-GS Training</i> | 94,00 |
| <i>Drishti-GS Test</i> | 96,08 |
| <i>Drions</i> | 90,00 |
| PROMEDIO | 91,54 |

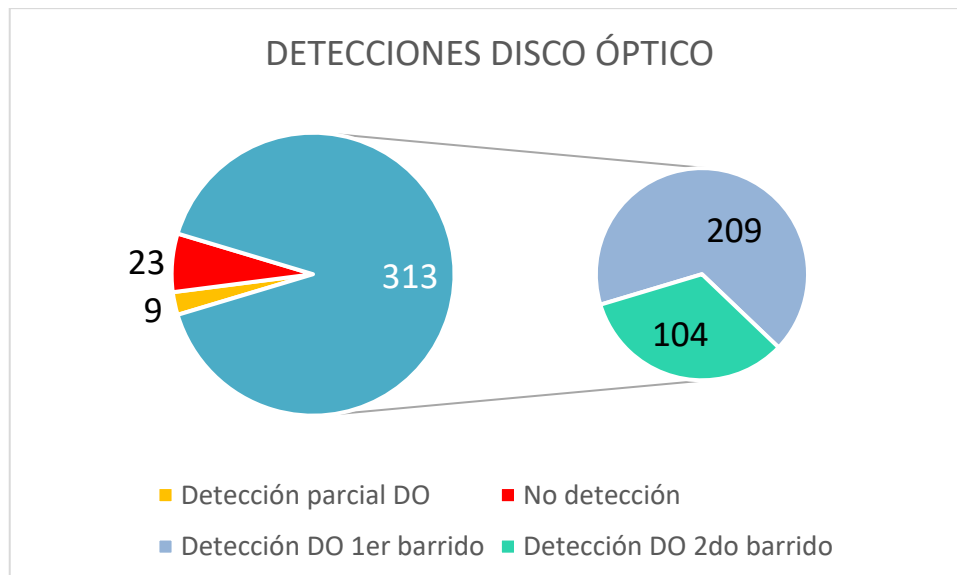


Figura 53 - Diagrama con las proporciones de detección de DO en conjuntos de imágenes.

En todo el conjunto de imágenes analizados, los resultados obtenidos son muy prometedores debido ya que se logró un porcentaje de detección mayor al 90%. La

aplicación de entropía se ha validado y sustentado exitosamente debido a que, de manera cuantitativa, los resultados numéricos pertenecientes a cada bloque tenían en promedio una entropía alta respecto a los otros bloques; esto conlleva a que si se consiguió localizar el DO dentro de una imagen de fondo de ojo. De este modo, los bloques candidatos lograron en su mayoría de corridas establecer que el DO se encontraba dentro del mismo, es decir, que el establecimiento y la selección del bloque candidato consigue ser el principal paso previo a la detección, ya que esta se reduce a ese espacio seleccionado y el fragmento de interés logra ser localizado.

3.3.2. Resultados totales obtenidos con el segundo método de detección

En esta sección, se analizarán los resultados conseguidos tras la aplicación del segundo método de detección del DO en los cinco conjuntos de imágenes propuestos.

El porcentaje de éxito de la detección del DO es considerado tras descartar las imágenes en las que el DO se detectó parcialmente, esto es, en las que el DO no estaba en su totalidad dentro del bloque candidato y también en los casos de no detecciones. Por consiguiente, los resultados totales logrados arrojaron un porcentaje promedio de detección del DO del 87.38%.

La Tabla 20 muestra el conteo de imágenes en todos los conjuntos de imágenes con detección y no detección del DO.

Tabla 20 - Resultados totales de detección por cada conjunto de imágenes.

| Conjuntos de Imágenes | Detección DO | Detección total DO | Detección parcial DO | No detección DO |
|------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <i>DIARETDB</i> | 79 | 67 | 12 | 10 |
| <i>HRF</i> | 43 | 38 | 5 | 2 |
| <i>Drishti-GS Training</i> | 49 | 45 | 4 | 1 |
| <i>Drishti-GS Test</i> | 50 | 42 | 8 | 1 |
| <i>Drions</i> | 99 | 87 | 12 | 11 |
| TOTAL IMÁGENES | 320 | 279 | 41 | 25 |

Al mismo tiempo, se resumen en su totalidad los resultados de las detecciones, detecciones parciales y no detecciones del DO en la siguiente Tabla 21.

Tabla 21 - Resultados en conjuntos de imágenes de detecciones de DO completas, parciales y no detecciones.

| CONJUNTOS ANALIZADOS | DETECCIÓN TOTAL DO | DETECCIÓN PARCIAL DO | NO DETECCIÓN DE DO |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 5 | 279 | 41 | 25 |

Finalmente, para complementar las dos tablas expuestas anteriormente, en términos porcentuales se propone la Tabla 22, en la cual se muestra el promedio general de las detecciones del DO en todo el conjunto de conjuntos de imágenes sometidos al algoritmo del segundo método.

Tabla 22 - Promedio porcentual de detecciones totales de DO.

| CONJUNTOS | Porcentaje detección % |
|-----------------------------|-------------------------------|
| <i>DIARETDB</i> | 84,81 |
| <i>HRF</i> | 88,37 |
| <i>Drishiti-GS Training</i> | 91,84 |
| <i>Drishiti-GS Test</i> | 84,00 |
| <i>Drions</i> | 87,88 |
| PROMEDIO | 87,38 |

Para terminar, se muestran los resultados globales de este método en el diagrama de la Figura 54.

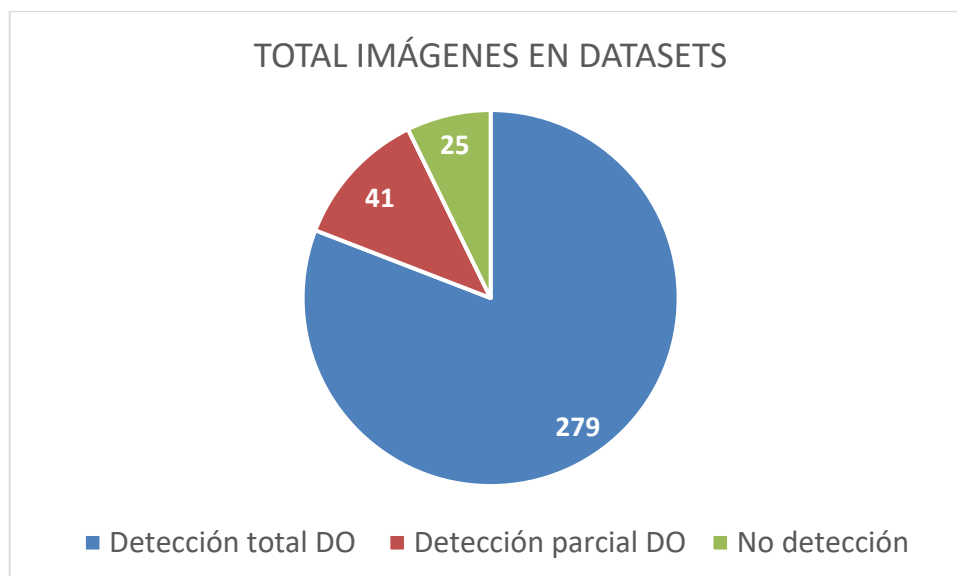


Figura 54 - Resultados totales en conjuntos de imágenes con la aplicación de segunda propuesta de detección.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el estudio de detección del DO se estudiaron, probaron y aplicaron algoritmos ampliamente utilizados de acuerdo con los hallazgos de la revisión de la literatura técnica y científica.

Asimismo, se identificó la métrica cuantitativa entropía que, tras su aplicación, se pudo determinar que en sus valores resultantes más altos dentro de un bloque candidato, se encontraba localizado el DO. Los resultados obtenidos tras la aplicación de las dos propuestas de detección fueron conseguidos de los conjuntos de imágenes de fondos de ojo que poseen alguna patología.

Se reportaron los resultados de los casos de detección alcanzados por cada conjunto de imágenes y al mismo tiempo se logró visualizar cómo se comportaba la métrica en cada imagen preprocesada de forma única y en conjunto. De la misma manera se probó que la métrica poseía diferentes valores en cada bloque y que el bloque detectado con mayor valor de entropía coincidía con el DO por cada imagen sometida a análisis.

Se lograron estudiar métodos de detección del DO en imágenes retinianas con presencia de retinopatía diabética, retinopatía de la prematuridad o de alguna patología. No obstante, estos métodos permitieron comprender como el algoritmo puede llegar a localizar el DO con una adecuada división de bloques y un proceso de filtrado que apoye a la detección de este.

De la misma manera, se pudo analizar, estudiar y comparar diferentes aplicaciones de filtrado en imágenes, esto permitió posteriormente definir tres procesos de filtrado en el fondo de ojo previos a la localización del DO.

Finalmente, se consiguió exitosamente implementar un método de localización del DO que alcance porcentajes altos de precisión en conjuntos de imágenes patológicas. Por otra parte, se recomienda aplicar más métricas cuantitativas en base al mismo esquema aplicado para la entropía en este caso de estudio. Esto podría demostrar que la detección del DO puede darse no solo de manera cualitativa como en otras investigaciones, sino también de forma cuantitativa y verse apoyado con resultados numéricos que indiquen en donde están las zonas candidatas de interés, como en este caso fue la del DO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. E. Sucar and G. Gómez, *Visión Computacional*. 2008.
- [2] B. Borrella Petisco, “Introducción a la visión artificial: procesos y aplicaciones.” 2022. Accessed: Dec. 27, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.14352/3290>
- [3] A. S. Gillis, “What is a pixel?,” 2022. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/pixel> (accessed Dec. 26, 2023).
- [4] SONY LATIN AMERICA INC., “Sony Cámara Digital Alpha 7 III,” 2023. <https://www.sony.com.ec/interchangeable-lens-cameras/products/ilce-7m3-body-kit> (accessed Dec. 26, 2023).
- [5] Digital Guide IONOS, “RGB: tres colores base para (casi) todo,” 2021. <https://www.ionos.es/digitalguide/paginas-web/disenio-web/colores-rgb/>
- [6] Wikipedia contributors, “Teoría del color,” *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2023.
- [7] L. Castellar, “Las propiedades del color: tono, luminosidad y saturación.,” 2021. <https://www.archipalettes.com/blog/las-propiedades-del-color>
- [8] R. Cortázar, “Teoría del Color -- Parte {II} -- Propiedades básicas del color,” *Blog de Acumbamail*. Acumbamail, 2022.
- [9] Facultad de Ciencias de la Computación BUAP, “Procesamiento Digital de Imágenes,” *Buap.mx*.
- [10] R. Wainschenker, J. M. Massa, and P. Tristan, “Procesamiento Digital de Imágenes,” *Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires UNICEN*, 2011. <https://users.exa.unicen.edu.ar/catedras/pdi/FILES/TE/CP1.pdf>
- [11] G. Zhang and Y. Wan, “A new optic disc detection method in retinal images based on concentric circular mask,” in *2016 5th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, 2016, pp. 790–794. doi: 10.1109/ICCSNT.2016.8070267.
- [12] B. Lesay, J. Pavlovičová, M. Oravec, and V. Kurilová, “Optic disc localization in fundus images,” in *2016 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/IWSSIP.2016.7502720.
- [13] M. Sahoo, S. Pal, and M. Mitra, “A Novel Optic Disc and Blood Vessel Detection Algorithm,” in *2018 IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON)*, 2018, pp. 74–78. doi: 10.1109/ASPCON.2018.8748519.

- [14] A. Narkthewan and N. Maneerat, "Automatic Localization of Optic Disc in Fundus Image Using Iterative Background Removal," in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEAST.2019.8802583.
- [15] The MathWorks Inc, "MATLAB," 2023. <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [16] The MathWorks Inc, "Descripción del producto MATLAB," 2023. https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html (accessed Dec. 26, 2023).
- [17] The MathWorks Inc, "Image Processing Toolbox Procesamiento, visualización y análisis de imágenes," 2023. <https://la.mathworks.com/products/image.html> (accessed Dec. 26, 2023).
- [18] C. Abascal Azanza, "Exploración del fondo de ojo," 2022. <https://www.cun.es/enfermedades-tratamientos/pruebas-diagnosticas/exploracion-fondo-ojo> (accessed Dec. 26, 2023).
- [19] IOBA, "En qué consiste el examen del fondo de ojo.," 2021. <https://www.ioba.es/2021/08/24/en-que-consiste-el-examen-del-fondo-de-ojo/> (accessed Dec. 26, 2023).
- [20] S. Belden, "Optic disc," *All About Vision*. All About Vision, 2023. [Online]. Available: <https://www.allaboutvision.com/eye-care/eye-anatomy/optic-disc/>
- [21] D. A. Micheau and D. D. Hoa, "Optic disc - e-anatomy," *IMAIOS*. IMAIOS, Mar. 2024. [Online]. Available: <https://www.imaios.com/en/e-anatomy/anatomical-structure/optic-disc-1557867200>
- [22] T. Kauppi *et al.*, "DIARETDB1 - Standard Diabetic Retinopathy Database," 2007. <https://www.kaggle.com/datasets/nguyenhung1903/diaretdb1-standard-diabetic-retinopathy-database> (accessed Dec. 27, 2023).
- [23] T. Kauppi *et al.*, "DIARETDB1," 2007. <https://paperswithcode.com/dataset/diaretdb1> (accessed Dec. 26, 2023).
- [24] A. Budai and J. Odstrcilik, "HRF (High-Resolution Fundus)," 2011. <https://paperswithcode.com/dataset/hrf> (accessed Dec. 26, 2023).
- [25] A. Budai and J. Odstrcilik, "High-Resolution Fundus (HRF) Image Database," 2011. <https://www5.cs.fau.de/research/data/fundus-images/> (accessed Dec. 26, 2023).
- [26] Aravind Eye hospital, "Drishti-GS1 Dataset Portal," 2015.

- <http://cvit.iiit.ac.in/projects/mip/drishti-gs/mip-dataset2/Home.php> (accessed Dec. 27, 2023).
- [27] J. García Feijoo, J. M. Martínez de laCasa, Hospital Miguel Servet, M. Rincón Zamorano, M. Bachiller Mayoral, and E. J. Carmona Suárez, “DRIONS-DB: Digital Retinal Images for Optic Nerve Segmentation Database,” 2008. <http://www.ia.uned.es/~ejcarmona/DRIONS-DB.html> (accessed Dec. 26, 2023).
- [28] E. J. Carmona, M. Rincón, J. García-Feijoo, and J. M. Martínez-de-la-Casa, “Identification of the optic nerve head with genetic algorithms,” *Artif. Intell. Med.*, vol. 43, no. 3, pp. 243–259, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2008.04.005>.
- [29] The MathWorks Inc, “Documentación Mathworks rgb2gray,” 2023. https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/rgb2gray_es.html (accessed Dec. 27, 2023).
- [30] The MathWorks Inc, “Mejora de la nitidez,” 2023. <https://la.mathworks.com/help/images/ref/imsharpen.html#btupaf8> (accessed Dec. 27, 2023).
- [31] Image J Docs, “Enhance Local Contrast (CLAHE),” 2020. <https://imagej.net/plugins/clahe> (accessed Dec. 28, 2023).
- [32] The MathWorks Inc, “Ecuación adaptativa de histograma limitada por el contraste,” 2023. <https://la.mathworks.com/help/images/ref/adapthisteq.html> (accessed Dec. 28, 2023).
- [33] E. F. Scozzina, “Teoría de la información y codificación: el significado de la entropía en la transmisión de información,” *Extensionismo, Innovación y Transf. Tecnológica*, vol. 6, pp. 208–218, 2020, doi: 10.30972/eitt.604394.
- [34] A. Marcos and D. De Filosofía, “Información y entropía,” *Arbor Ciencia, Pensam. y Cult.*, vol. 1, no. 549, pp. 111–138, 1991.
- [35] L. Muhammed, “Localizing Optic Disc in Retinal Image Automatically with Entropy Based Algorithm,” *Int. J. Biomed. Imaging*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/2815163.

ANEXOS

Anexo I – Criterios de evaluación para el Documento Escrito del Trabajo de titulación

| % | Criterios de evaluación | Descripción |
|------------|--|---|
| | Formato y estilo | El formato, la organización de contenidos, redacción, uso de gramática y ortografía, aplicación de normas de citas y referencia es: 1. Deficiente 2. Aceptable 3. Destacado |
| | Estructura | La organización de contenidos tiene una secuencia lógica y sigue un orden que facilita la comprensión del trabajo efectuado. 1. Deficiente 2. Aceptable 3. Destacado |
| | Consistencia entre objetivos y resultados y conclusiones | Los objetivos planteados para el trabajo son coherentes entre sí y se corresponden con los resultados alcanzados y las conclusiones derivadas del trabajo efectuado. 1. Deficiente 2. Aceptable 3. Destacado |
| | Pertinencia de conclusiones y recomendaciones | Las conclusiones y recomendaciones constituyen aportes significativos del trabajo ejecutado y son útiles para trabajos futuros. 1. Deficiente 2. Aceptable 3. Destacado |
| | Uso adecuado de referencias | Las referencias seleccionadas son pertinentes y se han citado de manera adecuada. 1. Deficiente 2. Aceptable 3. Destacado |
| 100 | | |