

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO ELECTRÓNICO DE
CARACTERIZACIÓN Y MONITOREO DE MADURACIÓN DE
MARACUYÁ A PARTIR DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES
PARA DISMINUIR PÉRDIDAS EN TIEMPO DE COSECHA**

Jonathan Andrés Larrotta Beltrán
Sergio Páez Espitia

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá, Colombia
2024



**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO ELECTRÓNICO DE CARACTERIZACIÓN Y
MONITOREO DE MADURACIÓN DE MARACUYÁ A PARTIR DEL PROCESAMIENTO
DE IMÁGENES PARA DISMINUIR PÉRDIDAS EN TIEMPO DE COSECHA**

Jonathan Andrés Larrotta Beltrán

Sergio Páez Espitia

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Electrónico**

DIRECTOR DEL PROYECTO

Oscar Mauricio Gelvez Lizarazo M.Sc

CODIRECTOR DEL PROYECTO

David Alejandro Martínez Vázquez Ph.D

ASESOR DEL PROYECTO

Carlos Julio Gelvez Torres Esp.

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Bogotá D.C.**

2024

RECTOR GENERAL

Fray Álvaro José Arango Restrepo, O.P

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL

Fray, Hernán Yesid Rivera Roberto, O.P

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL

Fray, Mauricio Antonio Cortés Gallego, O.P

SECRETARIO GENERAL

Dra. Lucero Galvis Cano

DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

Fray, Javier Antonio Hincapié Ardila, O.P

SECRETARIA DE DIVISIÓN

E.C Luz Patricia Rocha Caicedo

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Ing. Carlos Andrés Torres Pinzón.

Nota de aceptación:

Firma del director

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2

Bogotá D.C
Colombia
Noviembre de 2024

ADVERTENCIA

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.

DEDICATORIA

Jonathan Larrotta:

Quisiera dedicar este trabajo a mis padres, mi faro en la oscuridad. Gracias por su apoyo que me permitió enfocarme en este proyecto y por sus palabras de aliento que me impulsaron a seguir adelante. A Laura Paniagua mi compañera de aventuras, por sus noches en vela revisando mis avances y por su amor incondicional. No lo hubiera logrado sin su apoyo.

Sergio Páez:

Dedico esta tesis a mi familia, cuyo amor y apoyo han sido fundamentales en cada paso de este camino. A Alcira, Carlos, Gabriela, Luciana y Yolanda, por ser mi inspiración y motivación constante, y por recordarme siempre la importancia de seguir adelante con determinación. Gracias por creer en mí y por ser mi mayor fortaleza.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseamos expresar nuestro agradecimiento a nuestro director Oscar Gelvez y nuestro asesor Carlos Gelvez por su invaluable guía y orientación durante la realización de este proyecto. Sus conocimientos y paciencia fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Agradecemos también a la Universidad Santo Tomas por brindarnos las facilidades necesarias para llevar a cabo este trabajo, en especial a la facultad de Ingeniería Electrónica por el acceso a los recursos y equipos utilizados.

Jonathan Larrotta:

Un agradecimiento especial a mi familia, por su apoyo incondicional y por creer en mí en todo momento. A Laura Paniagua, por su paciencia y comprensión durante este proceso. A Sergio por su compañía y su espléndido trabajo en el desarrollo de este proyecto. A Bruno por su compañía en las noches en vela. Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos por sus palabras de aliento y compañía.

Sergio Páez:

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Alcira, Carlos, Gabriela, Luciana y Yolanda. Su apoyo incondicional, palabras de aliento y confianza en mí han sido esenciales en este camino. Gracias por estar siempre presentes, por acompañarme con cariño y comprensión en cada momento de esta travesía, y por inspirarme a perseverar y dar lo mejor de mí. También una mención especial a Jonathan por todo su esfuerzo y dedicación a lo largo del desarrollo de este proyecto. Por último, quiero agradecer a cada uno de mis amigos y compañeros por sus voces de aliento y preocupación durante este camino.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	1
LISTA DE TABLAS	2
LISTA DE IMAGENES.....	3
GLOSARIO	4
RESUMEN	5
ABSTRACT.....	6
1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 Planteamiento	8
1.2 Objetivos	9
1.1.1. Objetivo general.....	9
1.1.2. Objetivos específicos	9
1.3 Justificación.....	10
1.4 Impacto social	11
2 ESTADO DEL ARTE	13
3 MARCO TEORICO	16
3.1 Características de la Maracuyá.....	16
3.2 Adquisición de imágenes	17
3.3 Procesamiento de imágenes.....	18
4 DISEÑO METODOLÓGICO.....	20
5 DESARROLLO DE PROTOTIPO	22
5.1 Adquisición de imágenes.	22
5.1.1 Selección de cámara	22
5.2 Esquema electrónico.....	24
5.3 Diseño prototipo	24
5.4 Diseño PCB.....	28
5.5 Desarrollo software de procesamiento de imágenes basado en visión artificial.....	30
5.5.1 Selección modelo de color	30
5.5.2 Explicación librerías	32
5.5.3 Diagrama de flujo.....	33
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35

6.1	Clasificación de Maracuyá por estado de maduración	35
6.1.1	Primer estado de maduración	37
6.1.2	Segundo estado de maduración	40
6.1.3	Tercer estado de maduración	44
6.1.4	Cuarto estado de maduración.....	47
6.2	Análisis resultados obtenidos.....	51
6.3	Validación del prototipo	52
7	CONCLUSIONES	58
8	BIBLIOGRAFIA	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Respiración frutas. Tomado de [25]	16
Figura 2. Estados de maduración. Tomado de [26].....	17
Figura 3. Caja de luz. Tomado de [27]	18
Figura 4. Espacio de color HSV. Tomado de [32]	19
Figura 5. Metodología en cascada con retroalimentación	20
Figura 6. Cámara Zheozeig-DC40. Tomado de [33]	23
Figura 7. Esquemático LED's de potencia.....	24
Figura 8. Plano prototipo.....	25
Figura 9. Piezas plano prototipo	26
Figura 10. Plano 3D prototipo	27
Figura 11. Esquemático EasyEDA.....	28
Figura 12. Distribución componentes PCB.....	28
Figura 13. Capa superior PCB	29
Figura 14. Capa inferior PCB	29
Figura 15. Diagrama de flujo.....	33
Figura 16. Matriz de confusión.....	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de Pugh cámara	22
Tabla 2. Matriz de Pugh Procesamiento de imágenes	30
Tabla 3. Librerías.....	32
Tabla 4. Rangos de color.....	35
Tabla 5. Clasificación estados de maduración	36
Tabla 6. Comparación de patrones colorimétricos	52

LISTA DE IMAGENES

Imagen 1. Imagen cargada en BGR y RGB primer estado de maduración	37
Imagen 2. Imagen en HSV.....	37
Imagen 3. Máscara verde primer estado de maduración	38
Imagen 4. Máscara Amarilla primer estado de maduración	38
Imagen 5. Máscara completa primer estado de maduración	39
Imagen 6. Contorno primer estado de maduración	39
Imagen 7. Contorno HSV primer estado de maduración	40
Imagen 8. Imagen cargada en BGR y RGB segundo estado de maduración.....	40
Imagen 9. Imagen en HSV segundo estado de maduración	41
Imagen 10. Máscara verde segundo estado de maduración.....	41
Imagen 11. Máscara amarilla segundo estado de maduración	42
Imagen 12. Máscara completa segundo estado de maduración	42
Imagen 13. Contorno segundo estado de maduración.....	43
Imagen 14. Imagen en HSV contorno segundo estado de maduración.....	43
Imagen 15. Imagen cargada en BGR y RGB Tercer estado de maduración	44
Imagen 16. Imagen en HSV segundo estado de maduración	44
Imagen 17. Máscara verde tercer estado de maduración	45
Imagen 18. Máscara amarilla tercer estado de maduración	45
Imagen 19. Máscara tercer estado de maduración	46
Imagen 20. Contorno tercer estado de maduración	46
Imagen 21. Imagen en HSV contorno tercer estado de maduración	47
Imagen 22. Imagen cargada en BGR y RGB Cuarto estado de maduración.....	47
Imagen 23. Imagen HSV cuarto estado de maduración.....	48
Imagen 24. Máscara verde cuarto estado de maduración.....	48
Imagen 25. Máscara amarilla cuarto estado de maduración	49
Imagen 26. Máscara cuarto estado de maduración	49
Imagen 27. Contorno cuarto estado de maduración	50
Imagen 28. Imagen en HSV contorno cuarto estado de maduración	50

GLOSARIO

- **FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- **RGB:** Modelo de color Rojo, Verde y Azul
- **HSV:** Modelo de color Tono, Saturación y Brillo
- **MP:** Megapíxeles
- **ISO:** Sensibilidad que tiene una cámara para captar la luz en una fotografía
- **LED:** Diodo emisor de luz
- **PCB:** Placa de circuito impreso
- **CMYK:** Modelo de color Cian, Magenta, Amarillo, Negro
- **BGR:** Modelo de color Azul, Verde y Rojo

RESUMEN

El presente proyecto se centra en el desarrollo de un prototipo electrónico basado en visión artificial como soporte a los agricultores en la determinación del momento pertinente para cosechar la Maracuyá, buscando mitigar las pérdidas significativas que ocurren cuando se cosecha de forma prematura o tardía respecto del punto de maduración ideal. Lo anterior contribuye a la calidad del fruto desde su valor comercial, considerando como objetivo principal la adquisición de imágenes, el procesamiento de imágenes y la validación con un cuadro comparativo.

Palabras clave: Maracuyá, cosecha, maduración, pérdidas, prototipo, adquisición de imágenes, procesamiento de imágenes, validación.

ABSTRACT

This project focuses on the development of an electronic prototype based on artificial vision to support farmers in determining the appropriate time to harvest passion fruit, seeking to mitigate the significant losses that occur when it is harvested prematurely or late with respect to the ideal ripening point. This contributes to the quality of the fruit from its commercial value, considering as main objective the acquisition of images, image processing and validation with a comparative table.

Keywords: Passion fruit, harvesting, ripening, losses, prototype, image acquisition, image processing, validation

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento

Los cultivos climatéricos de fruta atraviesan varias problemáticas en su proceso de maduración las cuales pueden llegar a afectar el rendimiento, la producción y la cosecha, debido a plagas, enfermedades o deterioro del fruto por cosechas tardías.[1] De las problemáticas mencionadas la que se va a tratar en este documento es acerca de la cosecha a destiempo que consiste en cosechar antes o después de la maduración del punto ideal de maduración.

La cosecha de un cultivo de fruta antes de que llegue a la maduración puede traer algunas complicaciones en la comercialización que se realiza luego de la post cosecha, entre estas complicaciones se encuentra la fruta que no alcanza su sabor, que no logre la textura ideal, que los nutrientes en el fruto sean pocos y que cuando se almacenen estos frutos tengan mayor probabilidad de pudrirse. [2] Finalmente estas complicaciones hacen que los frutos cosechados antes de la maduración estén más propensos a desperdiciarse. [3]

La cosecha de un cultivo de fruta después de la maduración también trae con si algunas complicaciones para la comercialización, estas complicaciones inician con la pérdida de calidad en el fruto, que tengan mayor susceptibilidad a plagas o enfermedades, el desbalance negativo del valor comercial, el desperdicio excesivo de los frutos debido a la descomposición y la pérdida de sabor. [4] Estas consecuencias tienen una similitud con cosechar antes de la maduración ya que el desperdicio de los frutos aumentaría en gran medida.

Analizando las problemáticas que conlleva cosechar antes o después de la maduración trae consecuencias en común. Sobre la fruta cultivada y sobre la persona que las cultivó. Sobre la fruta por la gran cantidad de desperdicio que se crea por no cumplir con los parámetros requeridos para su comercialización, y finalmente sobre la persona que cultivo la fruta por el dinero y tiempo perdido. [5]

¿Cómo el uso de tecnología electrónica en el procesamiento de imágenes puede contribuir a los tiempos de cosecha en un cultivo climatérico para disminuir las pérdidas del fruto?

1.2 Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Implementar un prototipo electrónico de caracterización y monitoreo del estado de maduración de Maracuyá, mediante el procesamiento de imágenes para la disminución de pérdidas en tiempos de cosecha.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar un prototipo de sistema electrónico de adquisición de imágenes por medio de cámaras fotográficas y dispositivos de procesamiento determinando los estados de maduración de la Maracuyá.
- Desarrollar un software de procesamiento de imágenes basado en visión artificial para la determinación del estado de maduración de la Maracuyá.
- Validar el prototipo electrónico mediante comparación de patrones colorimétricos del estado de maduración de la Maracuyá con la descripción de especialistas de cultivo postcosecha.

1.3 Justificación

Al hacer un análisis sobre la problemática se encontró como referente un cultivo climatérico que muestra las siguientes estadísticas dadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en las cuales casi una tercera parte de los alimentos producidos para el consumo humano, aproximadamente 1.300 millones de toneladas anuales se pierden o desperdician en todo el mundo"[6].

Las estadísticas mundiales son impactantes, pero las cifras que se tienen a nivel nacional preocupan aún más según el director de la organización que se encarga de agrupar a 24 bancos de alimentos a nivel nacional (Ábaco), "Se reporta que el 40 % de los alimentos que se desperdician en Colombia provienen de la producción agropecuaria". [7]

La problemática planteada mostró que cosechar en el tiempo incorrecto un cultivo, ya sea antes de alcanzar la maduración o después de la maduración, puede hacer que los frutos tengan una complicación cuando se vayan a comercializar. Por lo cual surge la necesidad de contrarrestar el desperdicio de fruta, la pérdida de dinero y tiempo invertido en los cultivos mediante la implementación de un sistema que se encargue del monitoreo de la fruta, el estado de la maduración y que pueda indicar cuándo es el momento próximo a la maduración ideal, dependiendo del tiempo de conservación que se requiere para la comercialización. Como se ve en los resultados obtenidos por la investigación [8], donde se implementa un sistema de visión artificial para la identificación del estado de madurez de frutas, alcanzando un 92,6 % de aciertos en la identificación del estado de maduración, a partir de un conjunto de 90 imágenes obtenidas de 90 frutas en diferentes estados de maduración, en comparación con el análisis manual acorde a lo establecido por la Norma técnica colombiana NTC 4101".

La implementación de un sistema como el mencionado ayudaría a mitigar los errores por procesos manuales en la selección e identificación de características físicas como se muestra en el artículo denominado sistema de clasificación por visión artificial de mangos tipo Tommy [9].

En dicho artículo se usa el procesamiento de imágenes para la identificación de características presentes en el mango, de esta manera se realiza una estimación en tiempo real de la calidad de cada fruta, además el uso de procesamiento de imágenes abre camino

para hacer un análisis estadístico acerca de la producción y el índice de daños de la fruta, también se establece que el uso de procesamiento de imágenes mejora la velocidad de respuesta en la caracterización de cada color RGB.

Concluyendo la implementación de un sistema como se mencionó anteriormente evitaría el desperdicio de frutas por cosecha en el tiempo incorrecto utilizando el procesamiento de imágenes por medio de la visión artificial, haciendo una automatización para la elección del tiempo de cosecha para un cultivo de fruta.

1.4 Impacto social

Los cultivos de fruta son procesos que conllevan un arduo trabajo debido al cuidado que se les debe dar mientras las frutas llegan a su estado de maduración como se menciona en [10].

Luego de terminar este proceso viene la cosecha que, aunque no dura tanto como cultivar es de gran importancia ya que según el tiempo en que se haga se podrá vender fruta de muy alta calidad o se echará a perder todo el cultivo, lo que hace que la cosecha en el tiempo ideal sea de gran importancia por lo que recae una gran responsabilidad en la persona encargada del cultivo en elegir el tiempo ideal para su cosecha según [11].

Por ende, la importancia de implementar un sistema que ayude al encargado del cultivo a decidir cuál es el tiempo ideal para su cosecha, lo que disminuiría el porcentaje de frutas desperdiciadas por no cumplir parámetros de comercialización y beneficiaría a la persona que cultivó las frutas, ya que el tiempo invertido en los cultivos no se vería afectado por un mal tiempo de cosecha.

Investigando los ODS (Objetivo de desarrollo sostenible) se analizó que el proyecto se enfocará en el número 12 el cual se basa en la producción de consumo responsable [12], el proyecto tiene un impacto sobre este ODS ya que se quieren evitar las pérdidas de fruta por culpa de cosechas tardías.

Otro ODS sobre el cual se enfatiza el proyecto es el número 15 vida de ecosistemas terrestres [12], el impacto que tiene es para mantener el cuidado en los ecosistemas terrestres, en este caso sobre los cultivos de fruta que se manejarán ya que muchas veces

el cuidado de estos cultivos se toma a la ligera y las frutas sufren de un desperdicio por un mal proceso de maduración.

2 ESTADO DEL ARTE

El tema principal sobre el cual se profundizará este proyecto de grado es acerca de la implementación del procesamiento de imágenes en cultivos o vegetación con el fin de automatizar procesos tediosos y de larga duración, para ello se hizo una investigación priorizando términos como procesamiento de imágenes, frutas, flores, tecno agricultura, poscosecha, clasificador de color. Esta investigación dio como resultado artículos de investigación relacionados con lo mencionado previamente.

En los cultivos de frutas se deben tener en cuenta varios parámetros para obtener una buena cosecha, para esto se necesita hacer un monitoreo constante para el cuidado del fruto como se menciona en el documento [13], dónde se explica el cuidado que hay que tener con el cacao, el cual debe cumplir en su etapa final de secado ciertas características como grosor, facilidad para separar la cáscara del grano, color café o chocolate, naturaleza quebradiza, sabor medianamente amargo y un aroma agradable. Como técnica para el monitoreo de cultivo desde la visión artificial y deep learning se utilizan las redes neuronales, estas consisten en enseñar a las computadoras a procesar datos que para este caso serían imágenes como se utilizan en [14] donde se crea un modelo inteligente de clasificación industrial con asistencia robótica, enfocado inicialmente en la distinción del estado de maduración del plátano, en dicho modelo se utiliza la técnica de redes neuronales para entrar un sistema que sea capaz de tener un monitoreo constante sobre el cultivo de plátano. En este proyecto se adoptarán ambas técnicas anteriormente mencionadas para hacer el correcto seguimiento y monitoreo en el proceso de maduración de la Maracuyá.

La investigación realizada trata acerca de cómo se puede determinar el estado de maduración del aguacate mediante el procesamiento de imágenes usando una raspberry [15], en la cual se hace la adquisición de fotos de los aguacates desde que están poco maduros en una base de datos para así tener un mayor control del proceso de maduración del fruto y así tener mayor precisión cuando se vaya a establecer como listo para cosechar. En [16] se establece una metodología para la adquisición de la imagen en el SVA aplicando algoritmos de visión computacional en los programas C++ y Matlab, posteriormente se realizan medidas de color a muestras de naranja con diferente grado de madurez en el SVA y en un espectrofotómetro HunterLab. Este proyecto hará una adquisición de fotografías a partir de sensores y cámaras para mejorar la calidad de imagen al hacer el procesamiento con visión artificial.

El artículo [17] analiza la implementación del procesamiento de imágenes mediante el monitoreo del crecimiento y desarrollo de cultivos y flores, esto se llevó a cabo de una manera sencilla en la cual no se incorporaron recursos de alto costo mientras se le hacían pruebas y se entrenaba el software. El procesamiento de imágenes tiene una gran relevancia dentro de la aplicación de sistemas que se encarguen del monitoreo del estado de maduración del fruto como se ve en [18] en el cual se hace un proceso de selección para arándanos que serán exportados a diferentes lugares, para esto se deben tener en cuenta las condiciones de maduración de este fruto con el fin de entrenar el sistema. El aporte que se obtiene de estos proyectos son las condiciones del estado de maduración que se deben tener en cuenta para la cosecha en este caso de la Maracuyá.

La adquisición de imágenes se hace teniendo en cuenta los colores RGB (rojo, verde y azul), en el cual se procesa una imagen donde se aplican las diferentes técnicas para mejorar la calidad, para la segmentación que consiste en la división de la imagen por píxeles, extracción de características de color, de textura, de morfología y de bordes así mismo se implementó en el artículo [19]. También es importante en la adquisición de imágenes que la fotografía sea de la mejor calidad teniendo en cuenta condiciones como la iluminación, así como se establece en [20] en el cual se hace el reconocimiento de la pera en tiempo real, utilizando el brillo adecuado y con equipos tecnológicos. En este proyecto se planea hacer una obtención de imágenes a través de sensores y cámaras en un cultivo de Maracuyá diario para mejorar el análisis de colores RGB por procesamiento digital.

En otro contexto, en un banco de comida [21] se implementó esta estrategia con el fin de solucionar la ineficiencia o falta de personal, además para saber el estado de la comida, eliminarla o conservarla dependiendo de su estado, esto se implementa con una mezcla de una banda transportadora la cual actuara dependiendo del criterio de la IA, logrando así conservar de mejor manera la comida en dicho lugar. El siguiente artículo [22] las imágenes resultantes de la constancia del color se introducen en el proceso de clasificación de imágenes, en el que se extraen las características, se concatenan con las características clave de la Blockchain, se fusionan semánticamente, por último, se clasifican mediante la función de activación softmax. En ambos proyectos se utilizan técnicas para la clasificación de estados de maduración para los diferentes frutos y saber si es tiempo de cosecha o no, para la Maracuyá se deben tener en cuenta los colores de la Maracuyá para hacer una correcta clasificación por maduración teniendo en cuenta el tiempo total del cultivo.

El artículo [23] implica la utilización del modelo YOLOv5 para el aprendizaje profundo en el contexto agrícola la cual evalúa la maduración de pitahayas en tres etapas. El prototipo se basa en una cabina compuesta por elementos primordiales para la visión artificial que es

una cámara web de alta resolución y luz blanca artificial, adicionalmente se crea una interfaz para la interacción del usuario. En el artículo [24] se estableció un cultivo de Maracuyá que fue monitoreado a través de un sistema de visión artificial y se hizo una evaluación de eficiencia de los resultados obtenidos los cuales demostraron que aplicando el sistema de visión artificial se tuvo un aumento en la eficacia del 12 %. Estos proyectos ayudan a esta hacer un enfoque acerca de la eficiencia y la aplicación de cámaras, para la obtención de imágenes las cuales ayudan hacer una elección teniendo en cuenta los resultados de estos proyectos.

3 MARCO TEORICO

3.1 Características de la Maracuyá

Las frutas se clasifican según los efectos de maduración por características organolépticas como el color, la textura o la dureza a saber en climatéricas y no climatéricas esta clasificación es debido a la actividad respiratoria considerando las concentraciones de oxígeno presente en la atmósfera que son aprovechados por el periodo de maduración de la fruta, el intercambio de gases permite determinar el envejecimiento incluso después de la cosecha. Los compradores específicamente en Latinoamérica consideran como factor de compra o de selección de un fruto el color, la dureza y la textura a partir de ello es importante estudiar el proceso de maduración de la fruta para determinar procesos de poscosecha que garanticen una mayor durabilidad del fruto antes de su pérdida por putrefacción o descomposición. [25]

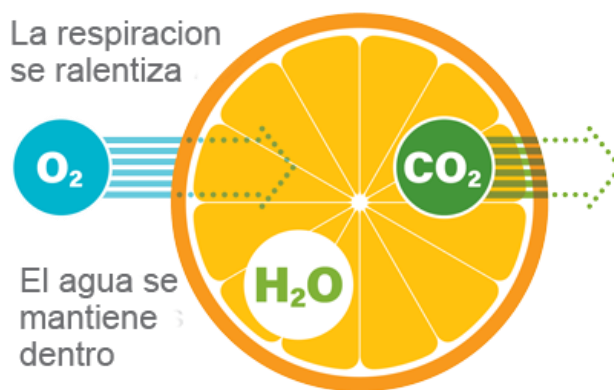


Figura 1. Respiración frutas. Tomado de [25]

Dependiendo del tipo de respiración de cada fruta, estos se clasifican en dos tipos: Climatéricos y no climatéricos, conocer la diferencia permite hacer una mejor selección al momento de la compra y a almacenarlas de manera adecuada para que conserven sus mejores propiedades. Las frutas climatéricas son aquellas que tienen una respiración muy rápida y por lo tanto una vez cosechadas y cortadas de la planta su vida es más corta. Estas se pueden comprar aún sin madurar porque pueden alcanzar su estado óptimo en el frutero o refrigerador en poco tiempo [25]

La cosecha de frutas está influenciada por las condiciones climáticas de la región, especialmente la distribución de las lluvias. En el caso de la Maracuyá, el tiempo de maduración se mide desde el cuajado o antesis hasta que alcanza su tamaño máximo. Este proceso de maduración toma entre 50 y 70 días y ocurre entre 7 y 9 meses después de la siembra, o unos 6 meses tras el trasplante. Además, temperaturas más altas y mayor exposición a la radiación solar aceleran el tiempo de maduración. [26]

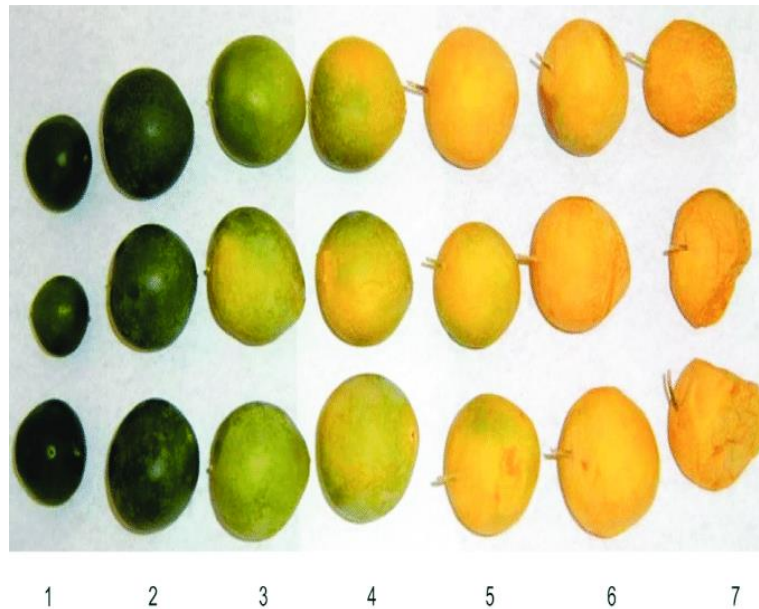


Figura 2. Estados de maduración. Tomado de [26]

3.2 Adquisición de imágenes

En el proceso de análisis y procesamiento de imágenes, la correcta adquisición de estas juega un papel fundamental para garantizar la precisión y calidad de los resultados. La selección de las condiciones bajo las cuales se capturan las imágenes, como la iluminación, el fondo y la disposición del objeto, puede influir considerablemente en el éxito de los métodos de procesamiento aplicados posteriormente. En este contexto, una técnica ampliamente utilizada es la fotografía de caja de luz, que asegura una iluminación uniforme y controlada, esto es indispensable para obtener imágenes libres de distorsiones ópticas.

La fotografía de caja de luz es una técnica que permite tomar fotos a objetos pequeños con una iluminación suave y uniforme, eliminando sombras y reflejos no deseados, esta caja debe estar cerrada por todos los lados, excepto la parte frontal por donde se toma la fotografía; las paredes internas de la caja suelen ser blancas y recubiertas de un material difusor de la luz. Al colocar una fuente de luz dentro de la caja la luz se dispersa por todas las superficies, envolviendo el objeto que se coloca en el centro y creando una iluminación suave y homogénea. [27]



Figura 3. Caja de luz. Tomado de [27]

3.3 Procesamiento de imágenes

La visión artificial abarca todas aquellas aplicaciones, tanto industriales como no industriales, en las que una combinación de hardware y software guía el funcionamiento de dispositivos mediante la captura y procesamiento de imágenes. Un sistema de visión artificial incluye varios elementos, desde la cámara que toma la imagen para su análisis hasta el sistema de procesamiento que interpreta y comunica los resultados. [28] El procesamiento se enfoca en imágenes para buscar una mejoría en su apariencia y resaltar detalles específicos que se desean explorar. Estas imágenes pueden haberse generado de diversas formas, como de manera fotográfica o electrónicamente. [29]

Después se debe hacer un proceso de segmentación de imágenes, que es una técnica de visión artificial, que separa una imagen digital en grupos de píxeles discretos (segmentos) para facilitar la detección de objetos y tareas afines. Al dividir los datos visuales complejos en segmentos con formas definidas, esta técnica permite un procesamiento de imágenes más rápido y eficiente. [30] A partir de esta segmentación se puede hacer un análisis de colorimetría, que es la técnica que estudia la medición del color, evaluando la longitud de onda en la que un color específico es visible para el ojo humano. [31]

Al hacer un análisis más profundo nacen los espacios de color, estos representan los distintos canales de color, que componen una imagen y le otorgan su tono característico. Existen varios tipos de espacios de color, cada uno con un propósito específico. Entre los más conocidos se encuentran RGB (rojo, verde, azul), CMYK (cian, magenta, amarillo, negro) y HSV (tono, saturación, valor). El espacio de color HSV (hue, saturation, value) es un modelo utilizado para representar colores. El canal de matiz (H) define el tipo de color, lo que lo hace muy útil en tareas de procesamiento de imágenes que requieren segmentar objetos según su color. La saturación (S) indica la intensidad del color, variando desde tonos grises (sin saturación) hasta colores vivos (completamente saturados, sin componente blanco). Por último, el canal de valor (V) expresa el brillo o la intensidad del color. [32]

En OpenCV, los canales del espacio HSV tienen los siguientes rangos: [H: 0–179, S: 0–255, V: 0–255]. La componente H representa “grados” de color, que normalmente van de 0 a 360, pero OpenCV los reduce a un rango de 180. Además, la saturación (S) se extiende desde el centro hacia el exterior, mientras que el valor (V) varía desde la base más oscura hasta la parte superior más brillante, como se muestra en la siguiente imagen. [32]

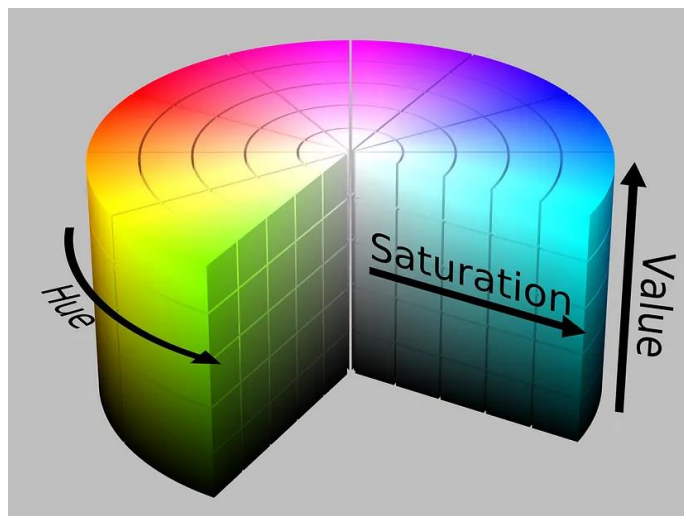


Figura 4. Espacio de color HSV. Tomado de [32]

4 DISEÑO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta la metodología del proyecto que se basa en la implementación de un prototipo electrónico para la determinación del estado de maduración de la Maracuyá y así evitar pérdidas en tiempos de cosecha, para ello se establece un proceso que contenga una serie de pasos y estrategias que se utilizan para alcanzar los objetivos del proyecto. La investigación que se lleva a cabo en este proyecto es cuantitativa, la cual se enfoca en la obtención y análisis numéricos, como en la cantidad de Maracuyá que se cosecha. El tipo de estudio que se utilizó es uno experimental ya que este consiste en establecer relaciones causales lo cual puede demostrar o generar una comparativa entre la calidad de la Maracuyá cosechada a partir de la experiencia o a partir del prototipo. Las variables que se deben tener en cuenta son el tiempo de cosecha y la colorimetría de la Maracuyá, por eso es necesario conocer el tiempo de maduración del fruto.

En el siguiente diagrama se muestran las fases por las que recorre el proyecto y más adelante se explica cada una de estas fases.

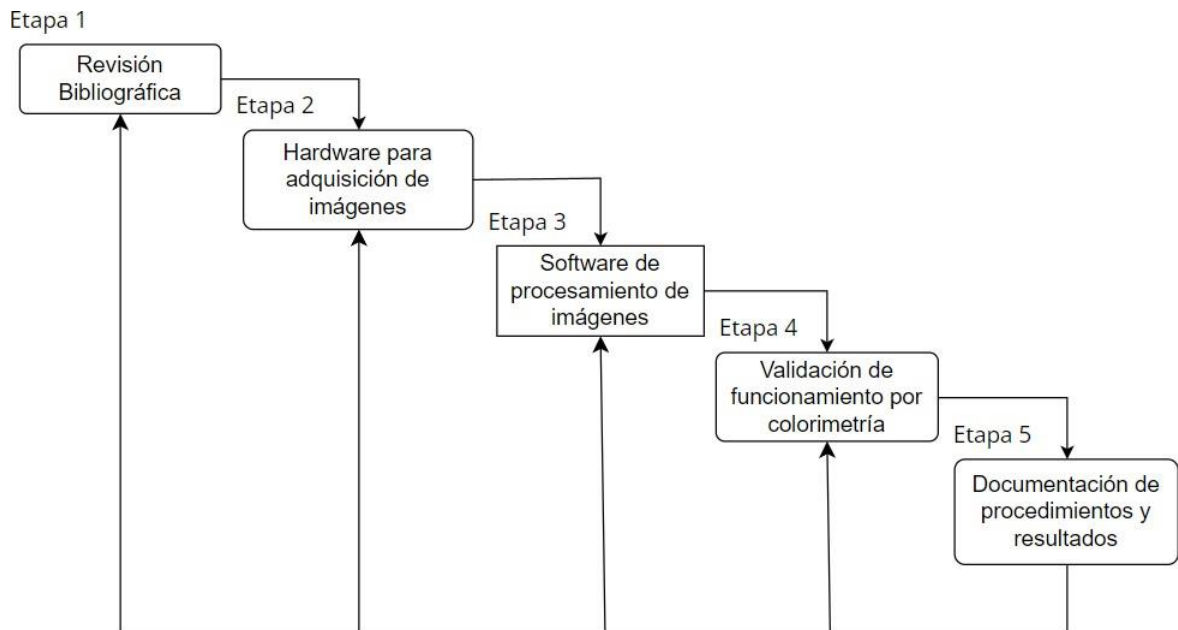


Figura 5. Metodología en cascada con retroalimentación

La primera fase consiste en establecer los parámetros importantes en el proceso de maduración de la Maracuyá a partir de recursos tecnológicos, del tiempo y bajo un cumplimiento en gastos presupuestales. Estas tareas anteriormente presentadas se harán a partir de un análisis de observación en el cultivo con la intención de almacenar las principales variables para tener en cuenta para el proyecto, cabe resaltar que la población objetivo será determinada a partir del dimensionamiento del cultivo ubicado en el municipio de Supatá Cundinamarca.

La segunda fase establece la implementación de técnicas de visión artificial como la segmentación, la extracción de características y la clasificación por procesamiento de imágenes, basado en colorimetría para determinar el estado de maduración de la Maracuyá; adicional a lo anterior se propone el desarrollo de una interfaz con el fin de visualizar los resultados. Como la obtención de imágenes que se hará día tras día a partir de cámaras o sensores ubicados en el cultivo, luego las imágenes obtenidas a partir del hardware desarrollado es necesario establecer un protocolo de comunicación para la manipulación de las fotografías.

Finalmente la validez de los datos obtenidos por el prototipo electrónico debe tener una evaluación de rendimiento en diferentes condiciones de iluminación y maduración, la manera en que esto se puede desarrollar es a través de un monitoreo continuo durante la maduración de la Maracuyá, para hacer la correcta comparación entre de colorimetría en una Maracuyá madura y una que se encuentra en proceso, por último el programa indicará si el cultivo de Maracuyá está listo para cosechar o aun no es el tiempo.

5 DESARROLLO DE PROTOTIPO

En este capítulo se elabora el prototipo que se encarga de la detección del estado de maduración de la Maracuyá para tiempos pertinentes de cosecha. Este prototipo fue elaborado a partir de la metodología descrita en el capítulo cuatro, en donde se evidencia como punto de partida la adquisición de imágenes, seguida de la construcción de las estructuras prácticas de uso, posteriormente la descripción del procesamiento de imágenes con cada una de las técnicas utilizadas de visión artificial y finalmente se termina comparando los resultados.

5.1 Adquisición de imágenes.

Como primer paso se evaluaron las diferentes opciones de cámara para la adquisición de imágenes, teniendo una matriz de Pugh para evaluar los criterios de mayor importancia para el presente proyecto de grado, tales como la resolución MP (Megapíxeles), la sensibilidad en valores ISO (sensibilidad que tiene una cámara para captar la luz en una fotografía), el lente tomando como medida la velocidad de apertura de este, el tamaño del sensor en pulgadas y el precio de cada cámara.

5.1.1 Selección de cámara

Tabla 1. Matriz de Pugh cámara

Características	Zheozig DC406	Anchiao CA07	Sheawasy C1-B	Referencia
Resolución	+1	+1	-1	-
Sensibilidad	+1	+1	+1	-
Lente	+1	-1	+1	-
Tamaño del sensor	0	0	-1	-
Precio	-1	-1	+1	-
Total	2	0	1	0

En la matriz se evaluaron tres cámaras que cumplían con los criterios básicos, para cada criterio se evaluaron si cumplían con los requerimientos básicos, si cumplía se sumaba un punto, si era igual al criterio se dejaba en 0 y si no cumplía se restaba un punto.

Los criterios son resolución de 1920 x 1080 píxeles, una sensibilidad de ISO 50 a 1600, un lente que se encargue de disminuir la distorsión, el tamaño del sensor debe ser de 1/4-inch y el precio acorde al presupuesto establecido.



Figura 6. Cámara Zheozeig-DC40. Tomado de [33]

Luego de hacer un análisis de cada cámara con la ayuda de la matriz se determinó por puntaje que la cámara para el proyecto debía ser Zheozeig-DC406 [32]. A partir de esta decisión se continuo con la creación del prototipo encargado de crear un ambiente controlado, para ello se estableció un esquema electrónico capaz de controlar los niveles de luz en un ambiente controlado, un primer acercamiento a este esquemático se realizó con un segmento lineal de conexión de LED's, sin embargo después de hacer pruebas se evidenció que los lúmenes producidos en el ambiente controlado eran pocos (200lm), esto debido a las pruebas realizadas con el prototipo, por ello se modificó el circuito para incorporar luces LED's de potencia las cuales se alcanzaron un ambiente controlado ideal (900lm) gracias al esquema electrónico presentado en la figura 7.

5.2 Esquema electrónico

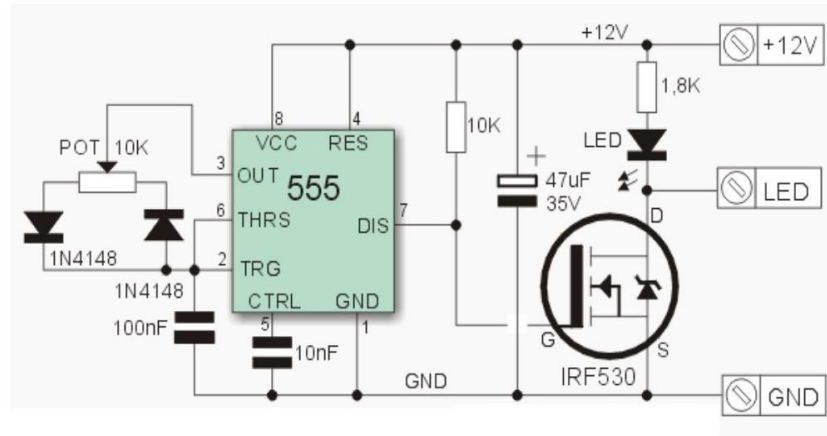


Figura 7. Esquemático LED's de potencia

5.3 Diseño prototipo

Se realizaron varios planos teniendo como referencia un paralelepípedo, que permita por medio de puertas móviles la introducción del fruto según el tamaño de este que en general puede medir entre 6 y 12 cm de longitud. Para realizar el diseño del prototipo se tuvieron en cuenta las dimensiones de la Maracuyá, tomando en cuenta esas medidas se construyó la entrada para el fruto al prototipo, luego se tuvo en cuenta el tamaño del lente de la cámara para dejar una abertura que permita la correcta adquisición de la fotografía, después se estableció el tamaño del prototipo teniendo en cuenta las dimensiones de la Maracuyá.

Uno de los primeros prototipos se realizó dejando poco espacio en el interior del prototipo con el propósito de eliminar cualquier sombra que afectara la fotografía, sin embargo, esto fue problemático ya que debido al poco espacio la fotografía resulto sobreexpuesta; así que se decidió dar más espacio al interior del prototipo, pero sin dar mucho espacio ya que la foto podría quedar subexpuesta, después de varios intentos se logró construir un prototipo de 18 cm de alto, 18cm de ancho y 22cm de profundidad con el cual las fotografías quedan viene expuestas.

Por consiguiente, se muestra el plano del prototipo diseñado para crear un ambiente controlado de iluminación y para hacer la adquisición de fotografías de la Maracuyá, presentado en la figura 8.

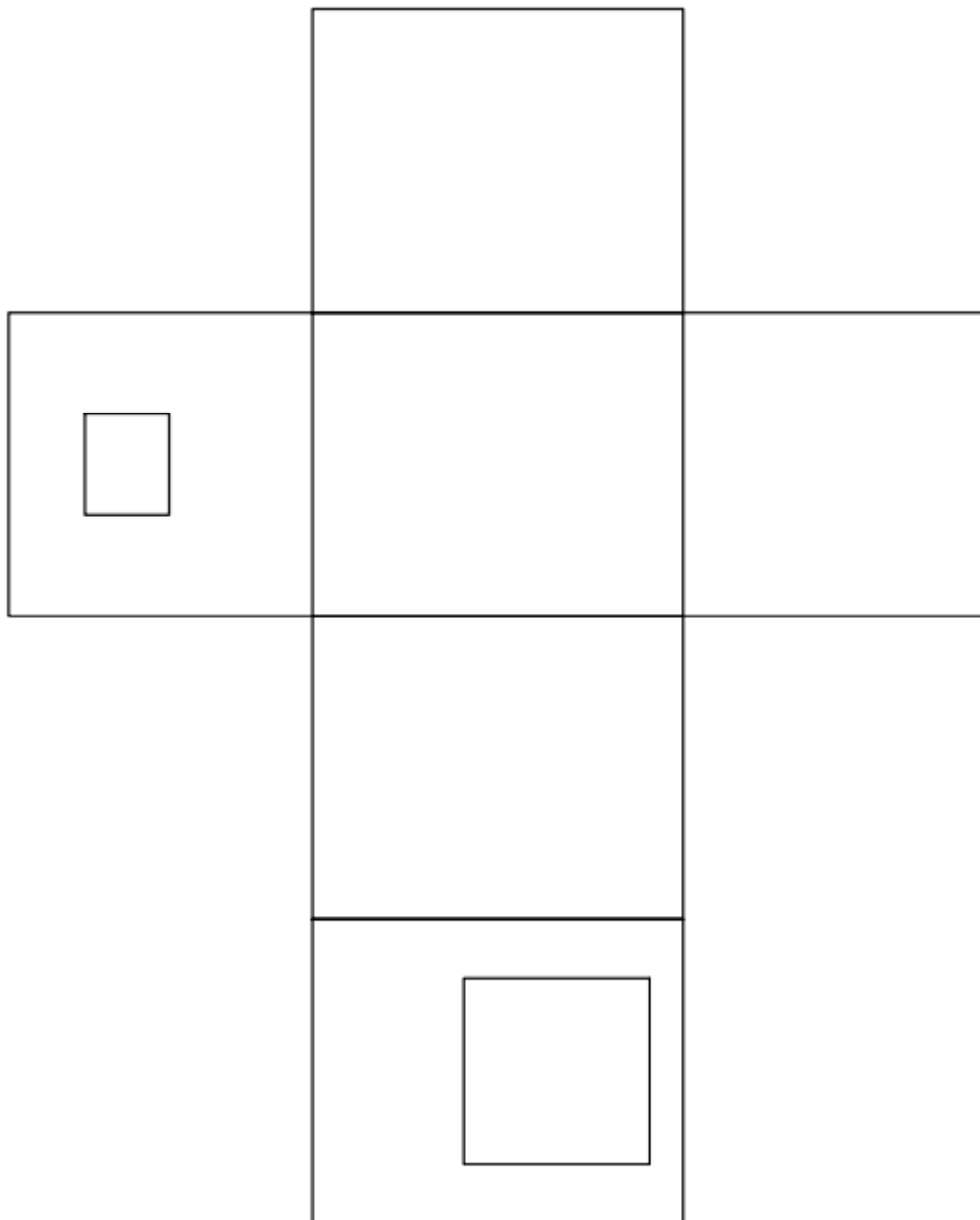


Figura 8. Plano prototipo

En la figura 9 se presentan las piezas que conforman el plano del prototipo, siendo la primera de 18x18 con un agujero de 5x6 donde se ubica la cámara para la toma de fotografías, la segunda de 22x18 que se repite 3 veces para la parte derecha, izquierda y el inferior del prototipo, la tercera de 18x18 que será la posterior respecto a la primera pieza y la cuarta de 22x18 con un agujero de 11x11 para la inserción del fruto.

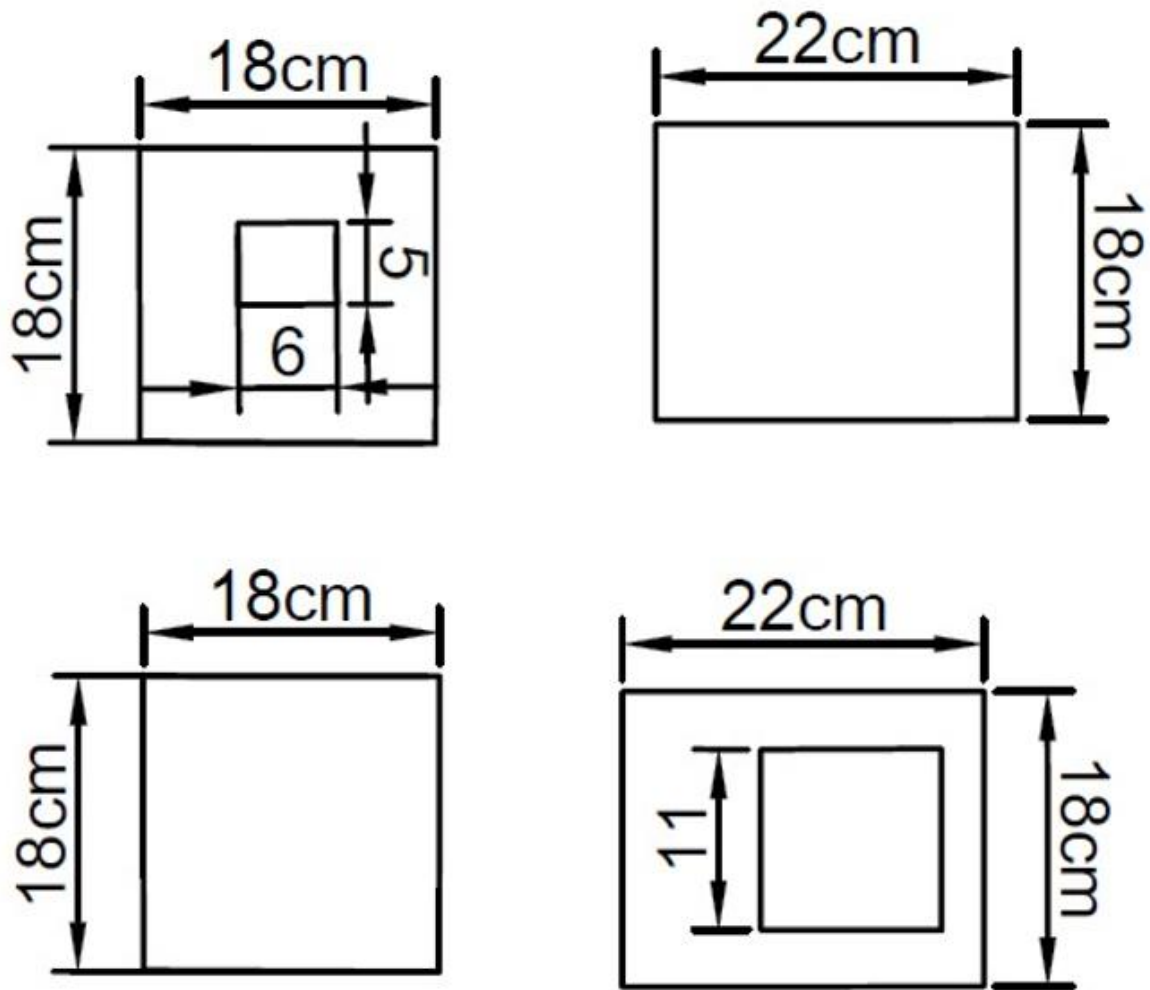


Figura 9. Piezas plano prototipo

Finalmente teniendo el diseño del prototipo, las medidas de las piezas y el plano final, se pasó a cortar las piezas y pintarlas. El proceso de pintar fue clave ya que el interior del prototipo debía estar en la capacidad de hacer rebotar la luz que proporciona el esquemático, por ello se hicieron algunos intentos con diferentes tipos de pintura como vinilos, temperas y pintura en aerosol, dando como resultado que la pintura en aerosol blanca hace rebotar la luz de una mejor manera en cada una de las paredes del prototipo y para el exterior del prototipo se utilizó una combinación entre vinilo y aerosol negro, para que no se filtrara ningún tipo de luz y obtener un ambiente controlado.

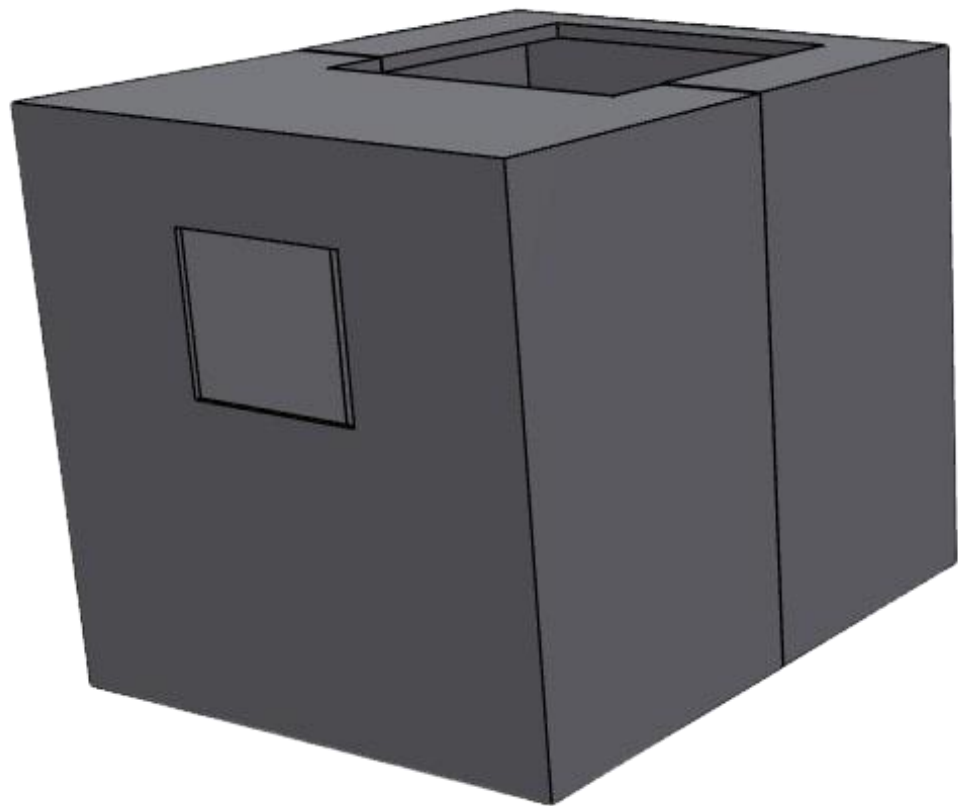


Figura 10. Plano 3D prototipo

5.4 Diseño PCB

En la figura 11 se puede apreciar el esquemático electrónico realizado en EasyEDA, allí se plasma el circuito implementado para el desarrollo de este proyecto, allí con la ayuda de la herramienta de etiquetas se organiza el circuito de una manera más cómoda y que facilita su legibilidad y comprensión.

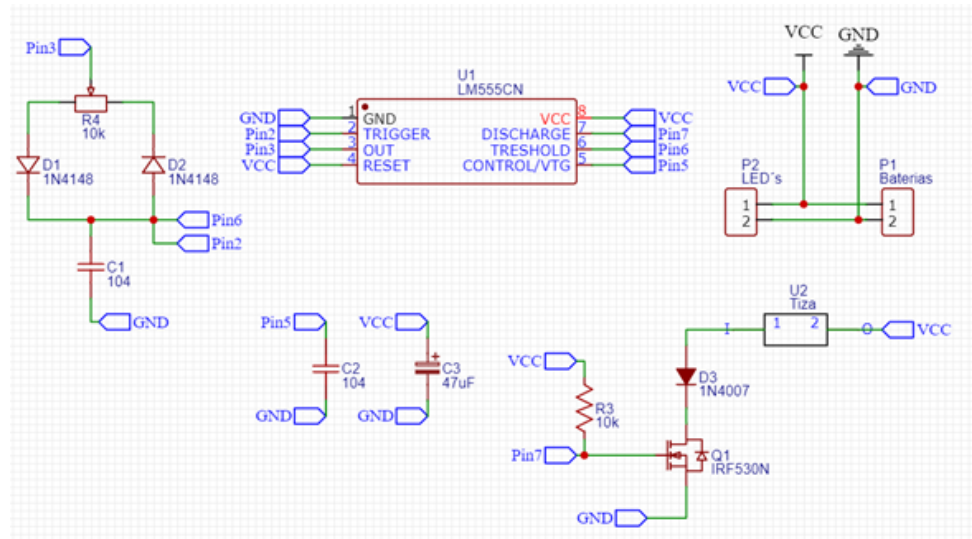


Figura 11. Esquemático EasyEDA

En la figura 12 se muestra la distribución que se le dio a cada uno de los componentes del circuito para el diseño de la placa de circuito impreso a doble capa.

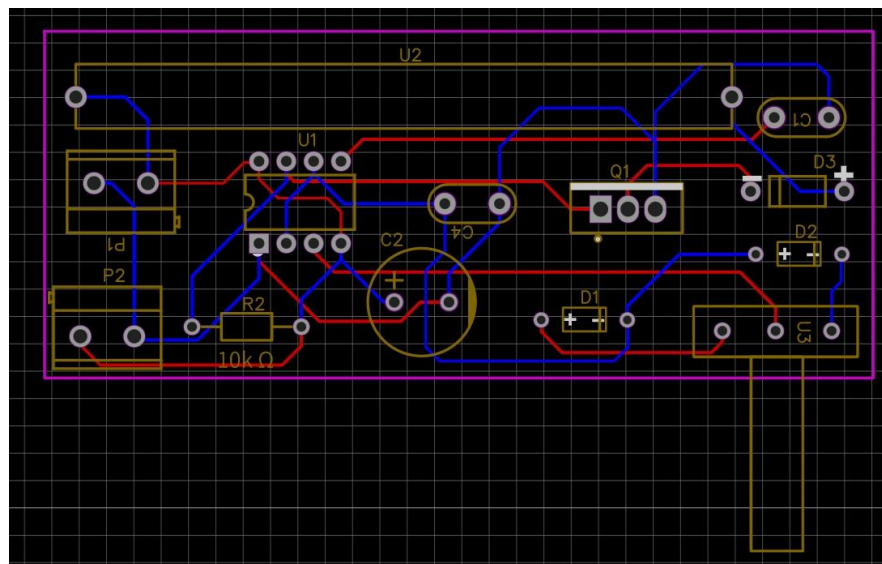


Figura 12. Distribución componentes PCB

A continuación, se muestra el resultado de cómo se realizaron las pistas en cada una de las capas de la placa de circuito impreso, siendo la roja la capa superior y la azul la capa inferior.

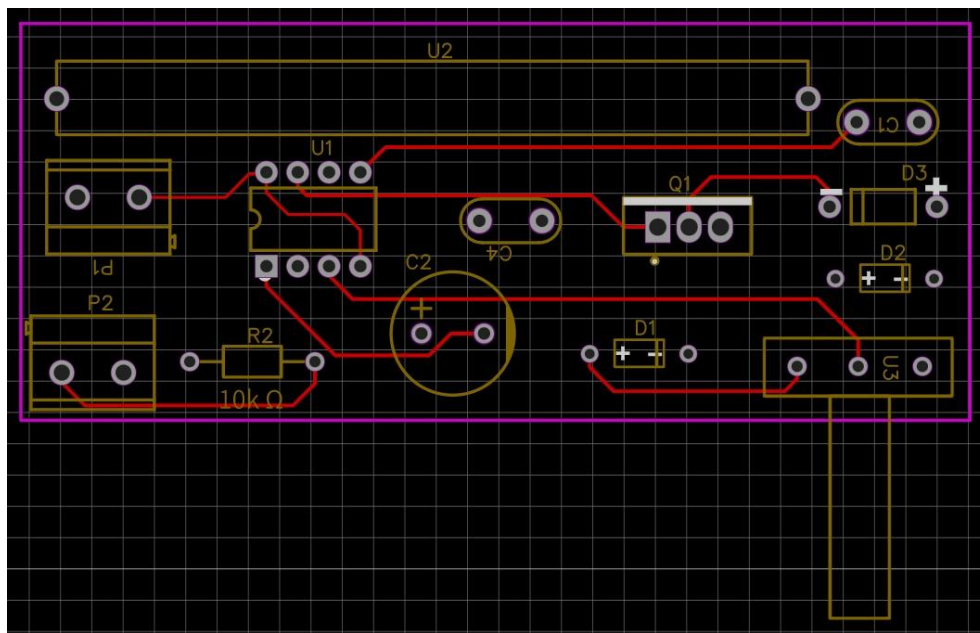


Figura 13. Capa superior PCB

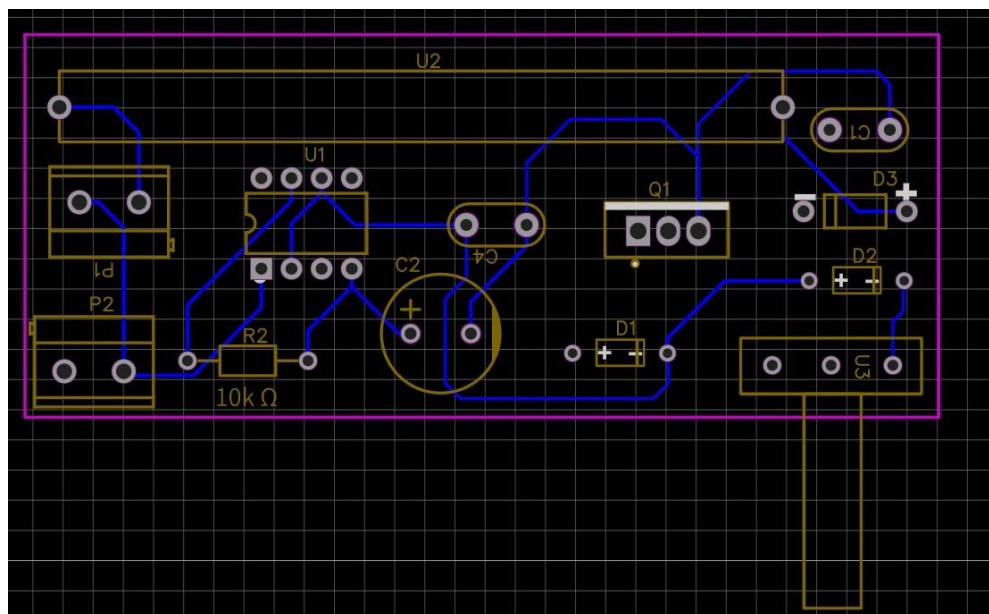


Figura 14. Capa inferior PCB

5.5 Desarrollo software de procesamiento de imágenes basado en visión artificial.

En el desarrollo del software surgieron algunas problemáticas cuando se iniciaron los análisis de las primeras imágenes adquiridas, estas se podían clasificar según su estado de maduración por segmentación por color RGB, sin embargo, mediante el las fotografías mejoraban su exposición deo de clasificar de manera adecuada, por ello se realizó un cambio en la técnica implementada, se pasó de segmentación por color RGB a segmentación por espacio de color HSV, con el fin de realizar este cambio se implementó la siguiente matriz de Pugh.

5.5.1 Selección modelo de color

Tabla 2. Matriz de Pugh Procesamiento de imágenes

Características	RGB	HSV	CMYK	Referencia
Precisión en detección de colores	-1	+1	-1	-
Facilidad de implementación	+1	0	-1	-
Compatibilidad con la cámara	+1	0	-1	-
Sensibilidad a variaciones	-1	+1	-1	-
Rendimiento computacional	+1	0	-1	-
Interpretabilidad	0	+1	-1	-
Total	1	3	-6	0

Como punto de partida se toman los modelos por color a partir de los cuales se toman las características en la matriz de Pugh, para ello se toma información para hacer este análisis de [34].

- Precisión en la detección de colores: El espacio HSV es generalmente más preciso para identificar colores según tonalidades, saturación y brillo, lo que es muy útil para detectar madurez. CMYK, aunque usado en impresión, no es tan adecuado para identificar matices de color en imágenes digitales.
- Facilidad de implementación: RGB es el más común y fácil de implementar, ya que la mayoría de las cámaras, incluida la Zheozig-DC40, captura en este formato. HSV requiere una transformación de RGB, pero sigue siendo fácil de manejar. CMYK es más complejo para imágenes digitales.
- Compatibilidad con la cámara Zheozig-DC40: Las cámaras digitales suelen capturar imágenes en el espacio RGB, por lo que no requieren conversiones adicionales. El espacio HSV requiere una conversión, pero es compatible. CMYK, al estar más orientado a impresión, sería menos compatible.
- Sensibilidad a variaciones de color: El espacio HSV sobresale en esta categoría, ya que descompone la imagen en tonalidades, lo que facilita identificar variaciones sutiles entre diferentes estados de maduración. RGB tiene limitaciones en cuanto a distinguir cambios sutiles de color debido a la combinación de los tres canales. CMYK es menos adecuado para distinguir estos matices.
- Rendimiento computacional: RGB es el más eficiente porque no requiere transformaciones. HSV implica un cálculo adicional para convertir las imágenes, pero no es costoso computacionalmente. CMYK no es adecuado para procesamiento de imágenes digitales y añade complejidad.
- Interpretabilidad: HSV es más interpretable para tareas relacionadas con la percepción del color, como la maduración. RGB es conocido, pero los cambios en color son menos intuitivos. CMYK, de nuevo, es más difícil de interpretar en este contexto.
- Se utilizaron las siguientes librerías para las operaciones de procesamiento de imágenes, para las operaciones con matrices y para la lectura de archivos e iteración a través de directorios.

El espacio de color HSV es la mejor opción para el proyecto, dado que tiene mayor precisión para detectar los matices de color en la Maracuyá, es altamente sensible a los cambios de tonalidad que ocurren durante la maduración, aunque requiere algo de procesamiento adicional sigue siendo manejable computacionalmente. El método RGB puede ser fácil de implementar y ser compatible, este método no es sensible a las variaciones sutiles de color. En el caso de CMYK resulta no ser adecuado para este tipo de análisis de imágenes.

5.5.2 Explicación librerías

A continuación, se muestran las librerías que utilizo el código para su correcto funcionamiento.

Tabla 3. Librerías

LIBRERÍA	PARA QUE SIRVE	SE USA PARA
cv2	Esta es la principal librería para el procesamiento de imágenes	Leer y convertir imágenes, crear y combinar máscaras, encontrar contornos y contar píxeles.
numpy	Proporciona estructuras de datos y funciones matemáticas	Definir los rangos de colores en HSV, cálculos de porcentajes de píxeles por color
os	Es una librería de Python para interactuar con el sistema de archivos	Navegar en la carpeta que contiene las imágenes

5.5.3 Diagrama de flujo

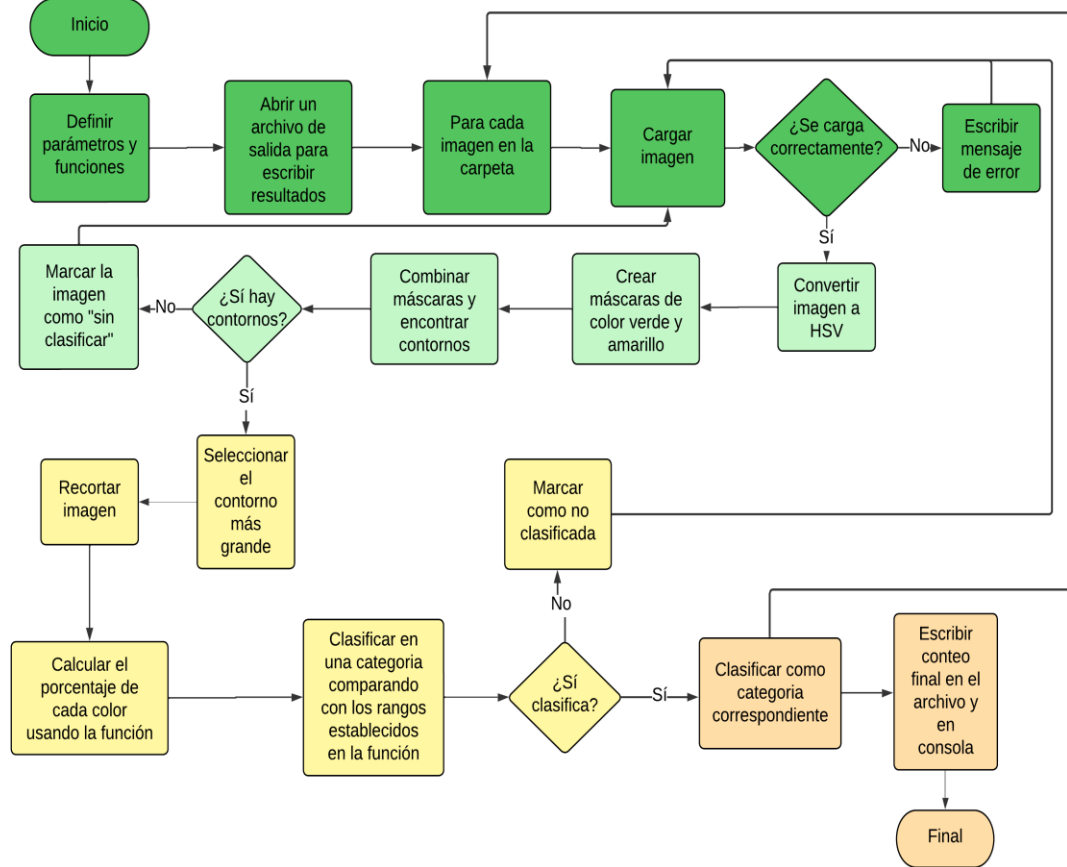


Figura 15. Diagrama de flujo

En la figura 15 se muestra el diagrama de flujo que explica el funcionamiento del código implementado para la clasificación de los estados de maduración de la Maracuyá, como se puede apreciar en el diagrama de flujo se separan los bloques por colores, donde el verde oscuro define los parámetros de clasificación, el verde claro aplica de los parámetros de clasificación, el amarillo compara la segmentación de color por intensidad ver o amarillo de cada imagen con los estados de maduración y el naranja muestra los resultados de la clasificación de cada Maracuyá.

En el proceso para la definición de parámetros de clasificación se crea una función que aplique la máscara sobre una imagen HSV, que cuente los píxeles segmentados por rangos y que retorne la cantidad de píxeles segmentados. Después de tener la función se crea un archivo de texto plano en el cual se documenta el estado de maduración de cada imagen. Luego se inicia la carga de cada imagen teniendo en cuenta si hay algún error con la carga de alguna imagen se escribe un mensaje de error y se carga la siguiente imagen.

Realizando la aplicación de los parámetros de clasificación se deben convertir las imágenes cargadas a HSV ya que al cargarlas al código se encuentran en BGR, se establecen los límites superiores e inferiores de la máscara que clasifican cada Maracuyá en verde o amarillo, También se crean cuatro rangos porcentuales que comparan los valores de cada imagen y clasifican según sus valores, Luego se halla el contorno de cada Maracuyá según la máscara, si no halla el contorno se carga la siguiente imagen y si se halla se continua con el proceso.

En la comparación de la segmentación de color por intensidad de verde o amarillo en cada imagen con los estados de maduración lo primero que se hace es recortar la imagen según el contorno hallado, esto para aumentar la zona de segmentación de color, luego se calcula el porcentaje de cada color usando la función para clasificar cada imagen según los rangos antes establecidos, si la imagen no coincide con ningún rango se clasifica como “No Clasificada” y se continua con las demás imágenes.

Finalmente, para presentar los resultados de la clasificación de las imágenes que se analizaron a partir de la captura y teniendo en cuenta cada estado de maduración definido, se clasifica dependiendo de los límites porcentuales mostrados en la tabla 5 y después de realizar este proceso con cada imagen, se imprime en consola la cantidad de Maracuyá que se encuentra en cada estado de maduración, de la misma manera que se realiza en el archivo de texto plano.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Clasificación de Maracuyá por estado de maduración

En esta sección se presentarán los resultados que se obtuvieron a partir de la clasificación hecha por el código para cada uno de los estados de maduración de la Maracuyá, lo primero será definir los rangos de color con los que se clasificaron las Maracuyás, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4. Rangos de color

COLOR	LIMITE INFERIOR			LIMITE SUPERIOR		
	H	S	V	H	S	V
VERDE	35	70	70	80	220	180
AMARILLO OPACO	18	30	80	32	120	180
AMARILLO BRILLANTE	18	100	150	35	255	255

Estos rangos se establecieron para clasificar los cuatro estados de maduración de la siguiente manera, en el primero, que son las Maracuyá que tienen la mayor parte de su área en un tono verde, en el segundo, que son las Maracuyá que tiene tonos verdes y amarillos, siendo predominante el verde y apareciendo tonalidades amarillas en los extremos, en el tercero son las Maracuyás que tiene los píxeles en el rango Amarillo Brillante y en el cuarto son las Maracuyás que tienen los píxeles en el rango de Amarillo Opaco.

La clasificación en cada estado de maduración se determina de la siguiente manera, para cada estado de maduración se define un rango de porcentajes según la cantidad de píxeles. Para cada uno de los cuatro estados de maduración con los que se clasificaran las imágenes que se encuentran en el dataset construido se hace un conteo y dependiendo de este conteo se clasifica en Maracuyás verdes, Maracuyás verdes/amarillas, Maracuyás maduras y Maracuyás dañadas.

La cantidad de píxeles por estado de maduración se presenta en la siguiente tabla

Tabla 5. Clasificación estados de maduración

MARACUYAS								
RANGOS	VERDES		VERDE/ AMARILLAS		MADURAS		DAÑADAS	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Color Verde	12,8	67,82	3,6	56,1	0,18	6,48	0,01	0,08
Color Amarillo Pálido	0,47	7,8	1,47	13,78	2,34	4,98	13,02	18,17
Color Amarillo Intenso	0	2,45	0	29,28	20,65	68,05	31,57	47,53

Por cada estado de maduración se inicia un contador por imagen según la cantidad de píxeles que se encuentren en cada rango, estos se dividen en la cantidad total del contorno y se multiplican por 100 para obtener el porcentaje de cada estado de maduración que se encuentra en la Maracuyá seleccionado.

Luego de tener cada cantidad se compara con los rangos de porcentaje y se clasifica en cada estado de maduración, cabe aclarar que los rangos de cada porcentaje se fueron acomodando según la clasificación por imagen en verdes, amarillos opacos y amarillos brillantes, después se tomaron los porcentajes mayores y mínimos de cada grupo para establecer los límites de los rangos de porcentajes.

6.1.1 Primer estado de maduración

Como se puede observar en la imagen 1 se hará el proceso de clasificación para una imagen escogida del dataset que se encuentra con un tono completamente verde, el primer paso a seguir es convertir la imagen en HSV para hacer el análisis como se muestra en la imagen 2.



Imagen 1. Imagen cargada en BGR y RGB primer estado de maduración



Imagen 2. Imagen en HSV

Como se puede ver en la imagen 2 se muestran los lugares dentro de la imagen donde se encontró un conjunto de píxeles que cumplen con los rangos del primer estado de maduración. Luego de tener la imagen en HSV se procede a aplicar las máscaras verde y amarillo para hacer una primera clasificación, ya que estos son los dos colores que se tienen presente en la clasificación y se muestra la máscara amarilla en la imagen 3, la máscara verde en la imagen 4 y la combinación de ambas máscaras en la imagen 5.

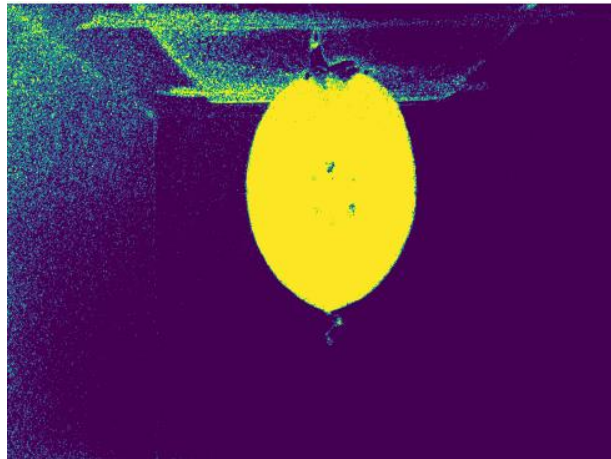


Imagen 3. Máscara verde primer estado de maduración

En el análisis que se hace con la máscara amarilla se puede observar que no hay píxeles que cumplan con la clasificación, por ello en la imagen 4 se muestra casi transparente la figura de la Maracuyá.

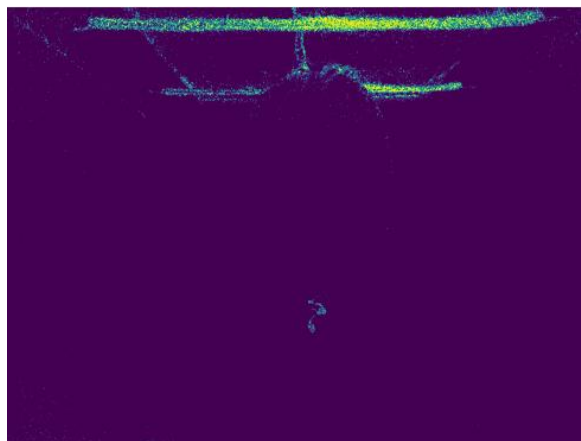


Imagen 4. Máscara Amarilla primer estado de maduración



Imagen 5. Máscara completa primer estado de maduración

Teniendo definidas las máscaras se procede a encontrar el contorno de la Maracuyá como se ve en la imagen 6, con el fin de realizar un contorno preciso de la Maracuyá, para así calcular el porcentaje de píxeles que se encuentran dentro del contorno, así como se muestra en la imagen 7 que son los píxeles que entran en el rango porcentual.



Imagen 6. Contorno primer estado de maduración

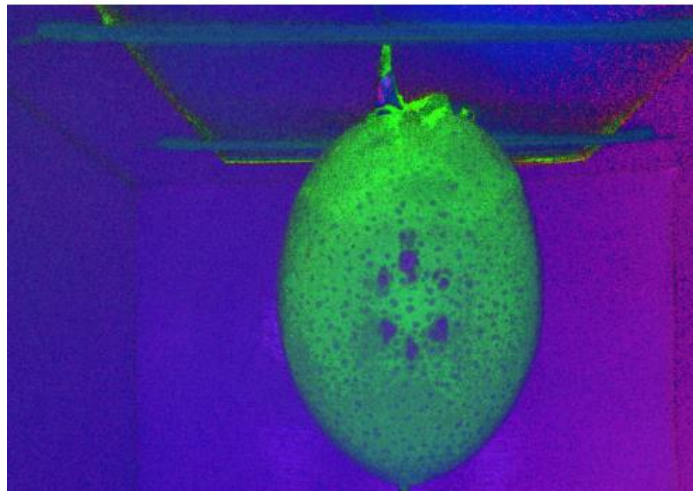


Imagen 7. Contorno HSV primer estado de maduración

6.1.2 Segundo estado de maduración

En el análisis del segundo estado de maduración se usa la imagen 8, que es una Maracuyá que tiene ambas tonalidades, lo primero será hacer la conversión a HSV como se muestra en la imagen 9 para hacer el correspondiente análisis con las máscaras ya establecidas.



Imagen 8. Imagen cargada en BGR y RGB segundo estado de maduración

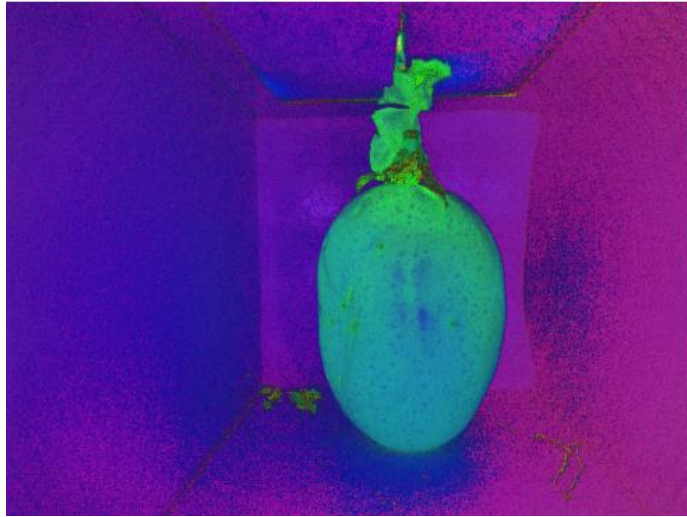


Imagen 9. Imagen en HSV segundo estado de maduración

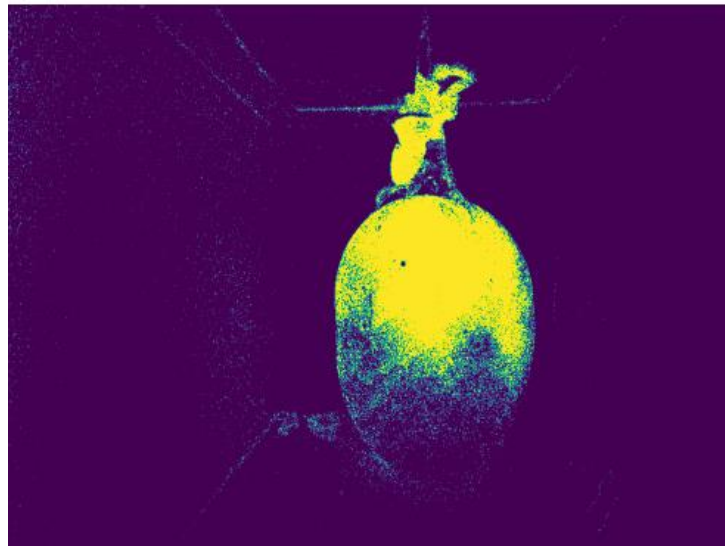


Imagen 10. Máscara verde segundo estado de maduración

Como se puede ver en la imagen 10 la máscara verde detecta la parte superior de la Maracuyá estos píxeles están dentro del rango verde y la máscara amarilla detecta los píxeles que están dentro del rango amarillo las cuales se encuentran en la parte inferior de la Maracuyá como se ve en la imagen 11.

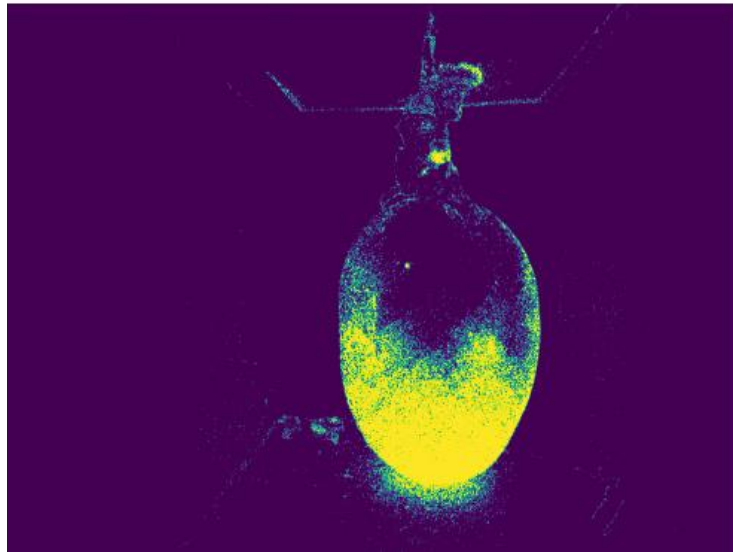


Imagen 11. Máscara amarilla segundo estado de maduración

Después de reconocer los píxeles que se encuentran en cada rango, se unen la máscara verde y amarilla con el fin de usarlo el resultado para hallar el contorno de la Maracuyá, como se puede ver en la imagen 12. A continuación, en la imagen 13 se ve el contorno que fue hallado y el recorte que se hizo a la imagen con el fin de hacer un análisis más preciso.

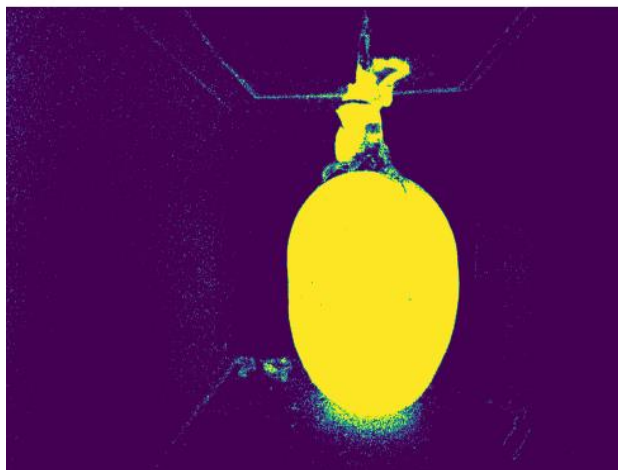


Imagen 12. Máscara completa segundo estado de maduración



Imagen 13. Contorno segundo estado de maduración

Finalmente, en la imagen 14 se ve el contorno de la Maracuyá en HSV, teniendo en cuenta este contorno se comparan los píxeles que se encuentran en cada rango establecido según el análisis de las máscaras, para este caso la Maracuyá se encuentra en el segundo estado de maduración según sus porcentajes elevados en el rango verde y amarillo brillante, esto podría cosecharse si se quiere transportar algún lugar lejano ya que la maduración y el cambio de color sigue así se coseche.

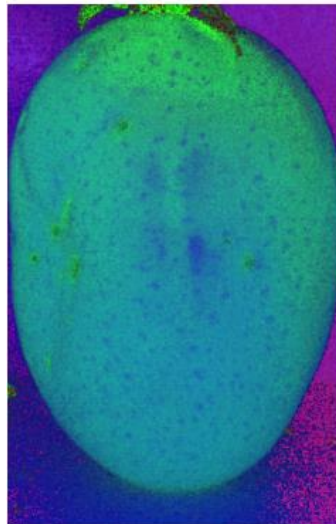


Imagen 14. Imagen en HSV contorno segundo estado de maduración

6.1.3 Tercer estado de maduración

En el tercer estado de maduración se analiza la siguiente Maracuyá donde se puede apreciar que el tono predominante en la imagen 15 es el amarillo, luego se convierte en HSV presentada en la imagen 16.



Imagen 15. Imagen cargada en BGR y RGB Tercer estado de maduración

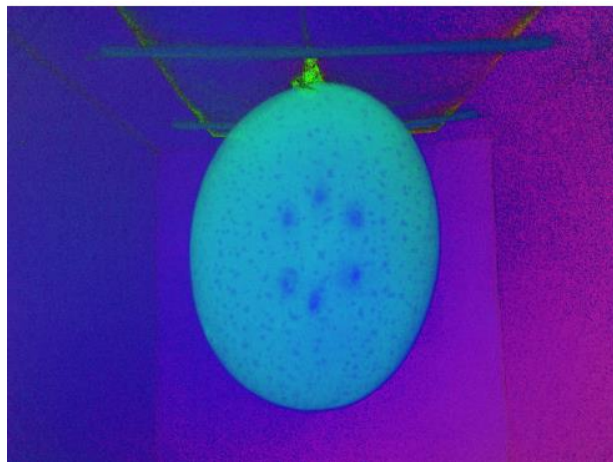


Imagen 16. Imagen en HSV segundo estado de maduración

En la imagen 17 y 18 se presentan la máscara verde y amarilla que analizan la imagen de la Maracuyá, como se puede ver la máscara verde detecta unos pocos píxeles en la intersección de las caras del prototipo, que a al final no tienen relevancia por su mínima cantidad. En la máscara amarilla se ven los píxeles que entran en el rango amarillo brillante, donde se observa que cubren casi en su totalidad la forma de la Maracuyá.

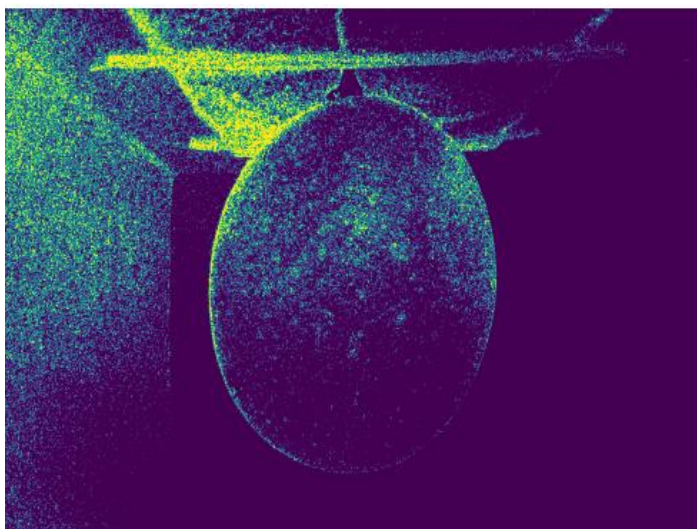


Imagen 17. Máscara verde tercer estado de maduración

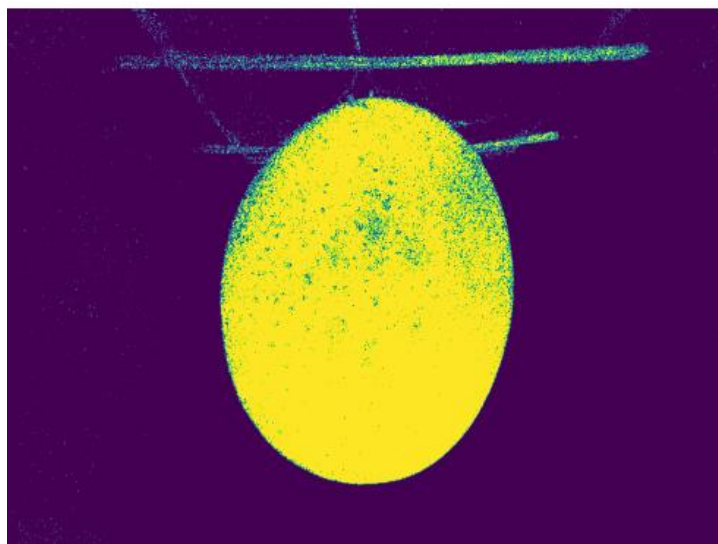


Imagen 18. Máscara amarilla tercer estado de maduración

En la imagen 19 se unen las máscaras verde y amarillo, después de tener esta máscara se genera el contorno de la Maracuyá con la que se puede hacer un recorte de la imagen y que esta se pueda analizar con un área efectiva mayor, así como se ve en la imagen 20.

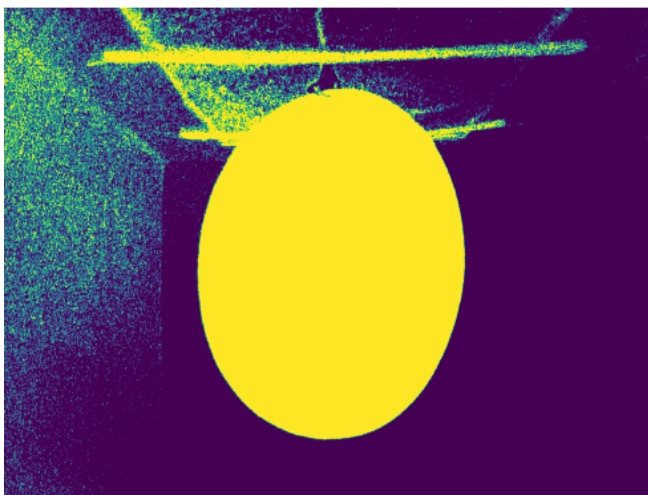


Imagen 19. Máscara tercer estado de maduración



Imagen 20. Contorno tercer estado de maduración

En la clasificación por color de la Maracuyá y según los porcentajes tomados por las máscaras, al realizar el análisis el programa indica que la Maracuyá se encuentra en el tercer estado de maduración y es apta para el consumo como se ve en la imagen 21.

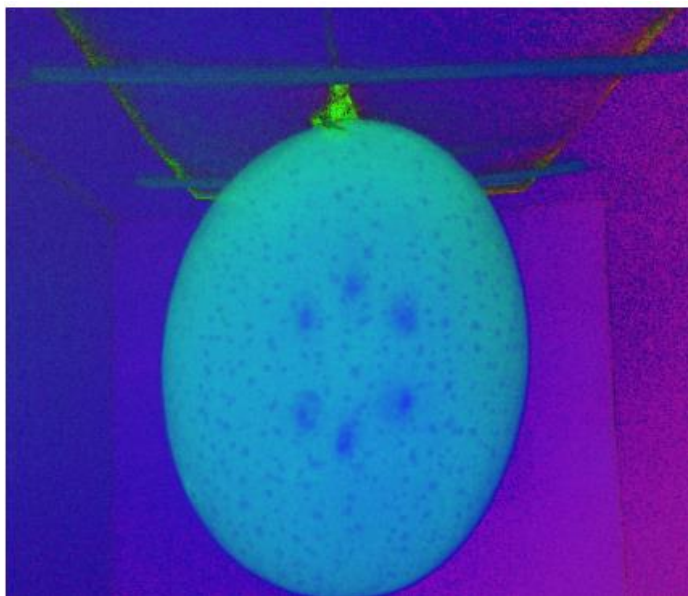


Imagen 21. Imagen en HSV contorno tercer estado de maduración

6.1.4 Cuarto estado de maduración

En el cuarto estado de maduración se presenta una Maracuyá que se encuentra en estado de descomposición como se muestra en la imagen 22 y en la imagen 23 se muestra en HSV para hacer la correspondiente clasificación por color.



Imagen 22. Imagen cargada en BGR y RGB Cuarto estado de maduración

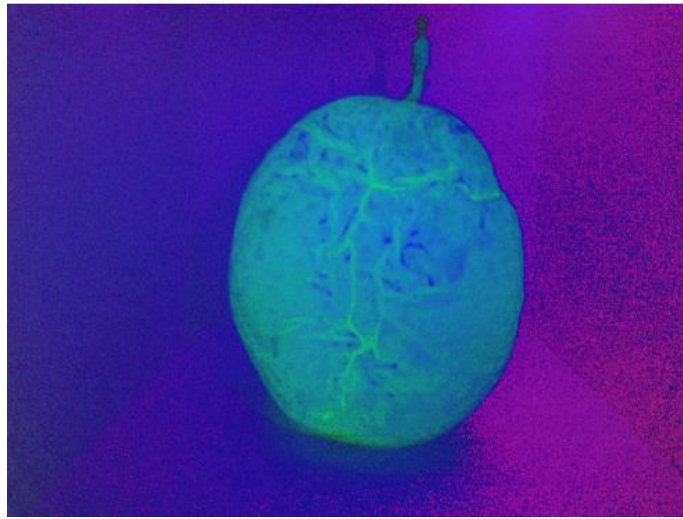


Imagen 23. Imagen HSV cuarto estado de maduración

Las máscaras verde y Amarillo detectan los píxeles que se encuentran dentro del rango, para este caso la máscara verde no detecta una cantidad significativa, en cambio la cantidad de píxeles que detecta la máscara amarilla es significativa y que entran en el rango de amarillo opaco.

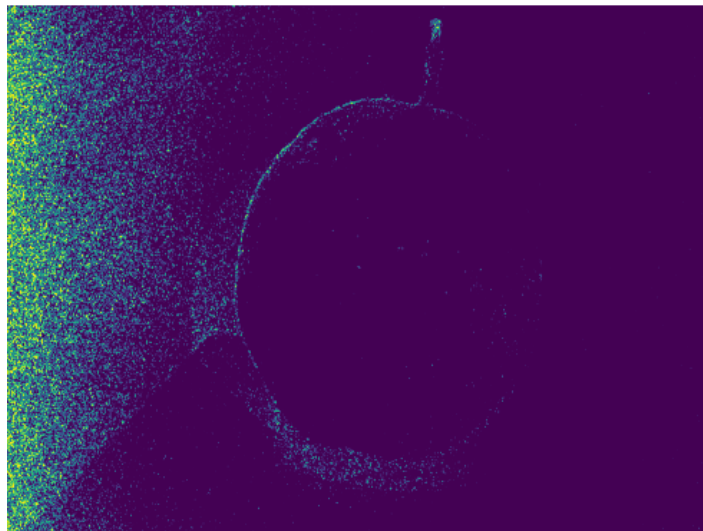


Imagen 24. Máscara verde cuarto estado de maduración



Imagen 25. Máscara amarilla cuarto estado de maduración

La máscara unida por la amarilla y verde se le realiza una detección de contornos resultante en la imagen 26, para mejorar el análisis por color que se hace con la clasificación.



Imagen 26. Máscara cuarto estado de maduración

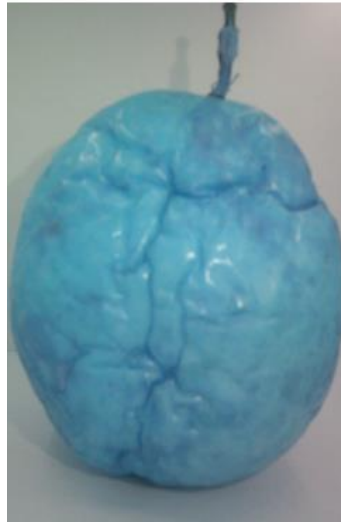


Imagen 27. Contorno cuarto estado de maduración

En la clasificación de la Maracuyá se tienen en cuenta los porcentajes dados por las máscaras, los cuales indican que la Maracuyá pertenece al cuarto estado de maduración y la Maracuyá se encuentra en un estado de descomposición no apta para el consumo como se ve en la imagen 28.

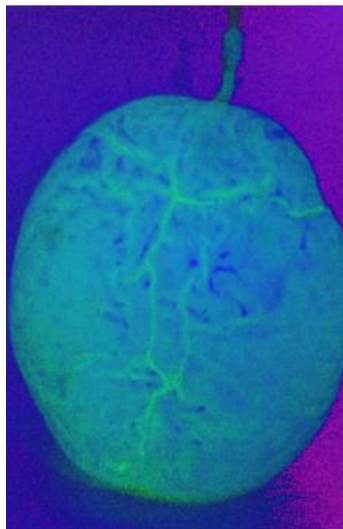


Imagen 28. Imagen en HSV contorno cuarto estado de maduración

6.2 Análisis resultados obtenidos

En esta sección se presenta el resultado final de la clasificación del dataset de imágenes de Maracuyá en su totalidad y su respectivo análisis.

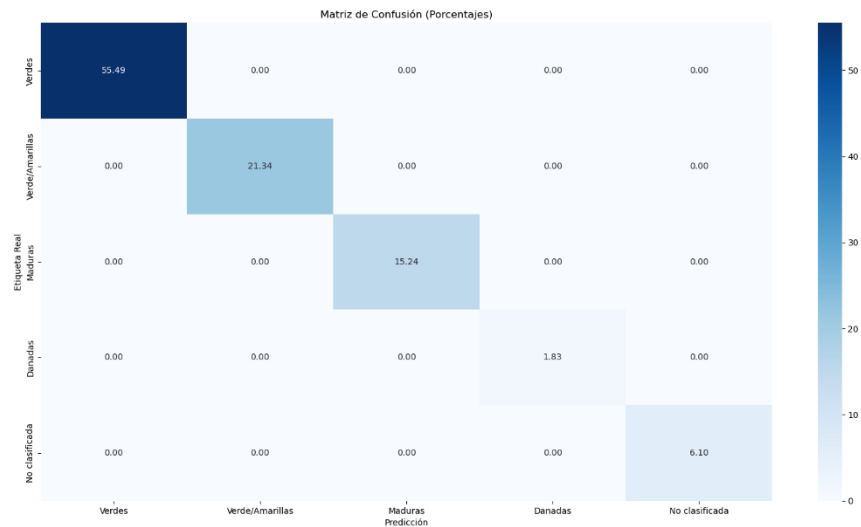


Figura 16. Matriz de confusión

La matriz de confusión presentada es una herramienta para evaluar el rendimiento de un programa diseñado para clasificar imágenes de maracuyá en función de su estado de maduración. Los estados se dividen en cuatro categorías: Verdes, Verde/Amarillas, Maduras, y Dañadas, con una categoría adicional para las imágenes que no pudieron clasificarse. Cada celda muestra el porcentaje de imágenes de un estado real que el modelo clasificó en cada categoría, destacando tanto los aciertos como los errores. Por ejemplo, el modelo clasificó correctamente el 55.49% de las imágenes como Verdes, el 21.34% como Verde/Amarillas, y así sucesivamente. Sin embargo, también se observan casos en los que algunas categorías tienen valores bajos o nulos, lo que podría indicar áreas de mejora en la clasificación de ciertos estados, como las Dañadas o las imágenes que quedaron sin clasificar (6.10%).

6.3 Validación del prototipo

En esta sección se explicará la validación que se realizó al prototipo implementado, con el cual se completo un dataset de 174 fotografías de Maracuyá en los diferentes estados de maduración por los atraviesa.

Se realizo una tabla comparativa a partir de los resultados presentados por el código, la opinión de una Ingeniero de alimentos y el experto del cultivo. Para cada opinión se presenta cada una de las imágenes recogidas y se clasifica según los cuatro estados de maduración definidos anteriormente.

Tabla 6. Comparación de patrones colorimétricos

IMAGEN	CÓDIGO				INGENIERO EN ALIMENTOS				EXPERTO DEL CULTIVO			
	V	V/A	M	D	V	V/A	M	D	V	V/A	M	D
DSCF0001				X								X
DSCF0002				X								X
DSCF0003				X				X				X
DSCF0004	X				X				X			
DSCF0005	X				X				X			
DSCF0006	X								X			
DSCF0007	X								X			
DSCF0008	X								X			
DSCF0009	X								X			
DSCF0010	X				X				X			
DSCF00011	X				X				X			
DSCF0012	X				X				X			
DSCF00013	X								X			
DSCF00014	X								X			
DSCF00019	X								X			
DSCF00020	X								X			
DSCF0021	X				X				X			
DSCF0022	X								X			
DSCF0023	X								X			
DSCF0024	X								X			
DSCF0025	X								X			
DSCF0026	X				X				X			
DSCF0027	X				X				X			

IMAGEN	CÓDIGO				INGENIERO EN ALIMENTOS				EXPERTO DEL CULTIVO			
	V	V/A	M	D	V	V/A	M	D	V	V/A	M	D
DSCF0028	X								X			
DSCF0029	X								X			
DSCF0030	X								X			
DSCF0031	X								X			
DSCF0032	X								X			
DSCF0033	X								X			
DSCF0034	X								X			
DSCF0035	X								X			
DSCF0036	X								X			
DSCF0037	X								X			
DSCF0038	X								X			
DSCF0039	X								X			
DSCF0040	X								X			
DSCF0041	X								X			
DSCF0042	X								X			
DSCF0043	X								X			
DSCF0044	X								X			
DSCF0045	X								X			
DSCF0046	X								X			
DSCF0047	X				X				X			
DSCF0048	X				X				X			
DSCF0049	X				X				X			
DSCF0050	X				X				X			
DSCF0051	X				X				X			
DSCF0052	X				X				X			
DSCF0053	X				X				X			
DSCF0054	X				X				X			
DSCF0055	X				X				X			
DSCF0056	X				X				X			
DSCF0057	X				X				X			
DSCF0058	X								X			
DSCF0059	X								X			
DSCF0060	X								X			
DSCF0061	X								X			
DSCF0062	X								X			
DSCF0063	X					X			X			
DSCF0064	X								X			
DSCF0065	X								X			

IMAGEN	CÓDIGO				INGENIERO EN ALIMENTOS				EXPERTO DEL CULTIVO			
	V	V/A	M	D	V	V/A	M	D	V	V/A	M	D
DSCF0066	X								X			
DSCF0067	X				X				X			
DSCF0068	X								X			
DSCF0069	X								X			
DSCF0070	X								X			
DSCF0071	X								X			
DSCF0072	X								X			
DSCF0073		X					X				X	
DSCF0074		X					X				X	
DSCF0075	X								X			
DSCF0076	X								X			
DSCF0079	X								X			
DSCF0080	X								X			
DSCF0081	X								X			
DSCF0082		X				X			X			
DSCF0083		X				X			X			
DSCF0084	X								X			
DSCF0085	X								X			
DSCF0086	X								X			
DSCF0087	X								X			
DSCF0088	X								X			
DSCF0089	X								X			
DSCF0090	X								X			
DSCF0091	X								X			
DSCF0092		X							X			
DSCF0093		X							X			
DSCF0096	X								X			
DSCF0097	X								X			
DSCF0098	X								X			
DSCF0099	X				X				X			
DSCF0100	X								X			
DSCF0101	X								X			
DSCF0102	X								X			
DSCF0103	X								X			
DSCF0104	X								X			
DSCF0105	X								X			
DSCF0106	X								X			
DSCF0107	X								X			

IMAGEN	CÓDIGO				INGENIERO EN ALIMENTOS				EXPERTO DEL CULTIVO			
	V	V/A	M	D	V	V/A	M	D	V	V/A	M	D
DSCF0108	X								X			
DSCF0109	X								X			
DSCF0110	X								X			
DSCF0111			X								X	
DSCF0112			X				X				X	
DSCF0113			X								X	
DSCF0114			X								X	
DSCF0115			X								X	
DSCF0116			X								X	
DSCF0117			X								X	
DSCF0118			X								X	
DSCF0119			X								X	
DSCF0120		X							X			
DSCF0121			X								X	
DSCF0122		X							X			
DSCF0123		X							X			
DSCF0124		X							X			
DSCF0125		X							X			
DSCF0126		X							X			
DSCF0127		X							X			
DSCF0128		X							X			
DSCF0129		X				X			X			
DSCF0130		X							X			
DSCF0131		X							X			
DSCF0132		X							X			
DSCF0133		X							X			
DSCF0134			X								X	
DSCF0135		X							X			
DSCF0136									X			
DSCF0137									X			
DSCF0138		X							X			
DSCF0139			X								X	
DSCF0140		X							X			
DSCF0141		X							X			
DSCF0142		X							X			
DSCF0143			X								X	
DSCF0144			X								X	
DSCF0145		X							X			

IMAGEN	CÓDIGO				INGENIERO EN ALIMENTOS				EXPERTO DEL CULTIVO			
	V	V/A	M	D	V	V/A	M	D	V	V/A	M	D
DSCF0146		X							X			
DSCF0147									X			
DSCF0148		X							X			
DSCF0149		X							X			
DSCF0150			X								X	
DSCF0151			X								X	
DSCF0152		X				X			X			
DSCF0153		X							X			
DSCF0154			X								X	
DSCF0155		X							X			
DSCF0156									X			
DSCF0157			X								X	
DSCF0158			X								X	
DSCF0159			X								X	
DSCF0160			X								X	
DSCF0161									X			
DSCF0162									X			
DSCF0163			X								X	
DSCF0164									X			
DSCF0165									X			
DSCF0166									X			
DSCF0167		X							X			
DSCF0168		X							X			
DSCF0169			X				X				X	
DSCF0170			X								X	
DSCF0171		X							X			
DSCF0172		X							X			
DSCF0173									X			
DSCF0174		X							X			

La Tabla 6 presenta una comparación detallada de los resultados obtenidos en la clasificación del estado de maduración de la Maracuyá mediante el código. Para cada una de las 174 imágenes del conjunto de datos, se presenta la clasificación asignada por tres evaluadores: el algoritmo desarrollado (código), un ingeniero en alimentos y un experto en el cultivo de maracuyá.

Cada columna de la tabla corresponde a una de las posibles clasificaciones del estado de maduración siendo V (verde), V/A (verde-amarillo), M (maduro) y D (dañado). Una marca "X" en una celda indica que el evaluador correspondiente clasificó la imagen correspondiente a esa categoría.

El algoritmo empleó rangos en el espacio de color HSV, cuantificando objetivamente las características visuales de las frutas. Por su parte, el experto en cultivo se basó en su amplia experiencia en el campo, evaluando aspectos cualitativos como la apariencia general y la textura de la fruta. El ingeniero de alimentos, en cambio, aplicó sus conocimientos sobre los cambios bioquímicos y fisiológicos que ocurren durante la maduración, considerando factores como la firmeza de la pulpa y el contenido de sólidos solubles.

Al comparar las clasificaciones de los tres evaluadores, se observa una alta concordancia en los resultados generales. No obstante, se detectan algunas diferencias notables. El ingeniero de alimentos agrupó las fotografías, lo que redujo la cantidad de marcas en su clasificación. La principal discrepancia se encuentra en el estado de maduración V/A. El experto en cultivo considera que las Maracuyás con tonos amarillos predominantes ya están maduras, mientras que el algoritmo y el ingeniero de alimentos reconocen la importancia de este estado intermedio.

El algoritmo revela que el estado V/A puede ser útil para identificar frutos que pueden ser cosechados y transportados a largas distancias sin deteriorarse, ya que la Maracuyá es una fruta climatérica y continúa madurando después de la cosecha. Esta perspectiva coincide con la del ingeniero de alimentos, quien también clasificó algunos grupos de fotografías en este estado. Estos resultados son cruciales para evaluar la precisión y confiabilidad del algoritmo, así como para identificar áreas de mejora. La capacidad del algoritmo para detectar el estado V/A sugiere su potencial para aprovechar la cosecha y el transporte de la Maracuyá.

7 CONCLUSIONES

En la implementación de un prototipo electrónico de caracterización y monitoreo de maduración de Maracuyá ha permitido llegar a las siguientes conclusiones.

Se logró planear y construir un prototipo electrónico que permite la correcta iluminación de la Maracuyá en los diferentes estados de maduración, este sistema de adquisición de imágenes funciona de manera precisa y estable gracias a la técnica caja de luz implementada en el prototipo, permitiendo la creación de una base de datos visuales que estén disponibles para la clasificación en los estados de maduración, además la integración de una cámara fotográfica ofreció una solución funcional para este tipo de aplicaciones agrícolas.

Se implementó un software de procesamiento de imágenes que aplica técnicas de visión artificial, específicamente en el espacio de color HSV para la clasificación de la Maracuyá en distintos estados de maduración. Este software permite identificar características visuales clave asociadas al color del fruto, logrando así una clasificación automatizada y fiable que asegura el proceso de selección de la Maracuyá en función de su grado de madurez.

El sistema fue validado mediante comparaciones entre los patrones colorimétricos y las clasificaciones de especialistas en cultivo poscosecha, mostrando una correspondencia significativa en la identificación de los distintos grados de maduración. Este proceso de validación confirmó la fiabilidad del sistema tanto en la captura de datos como en el análisis de colorimetría, asegurando su aplicabilidad práctica en el sector agrícola.

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] Victor Rubio Susan y Alberto Fereres Castiel. «CONTROL BIOLÓGICO DE PLAGAS Y ENFERMEDADES DE LOS CULTIVOS». En: *Centro de Ciencias Medioambientales (CCMA-CSIC)*. (2005).
- [2] PacLifeHome. *Los beneficios de la fruta según su estado de maduración*. 2020. URL: <https://www.paclifehome.cl/estados-de-la-fruta/>.
- [3] Maritza Marcela Martínez Anaya. *Estado actual de los desperdicios de frutas y verduras en Colombia*. 2017. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/234021142.pdf>.
- [4] Frank Saavedra. *Con la comida que se desperdicia al año en Colombia se podría alimentar a todo Panamá*. 2023. URL: <https://www.infobae.com/colombia/2023/09/30/>.
- [5] Edwin Vinicio Fajardo Caizaluisa Daysi Paulina Sangacha Robalino. «Análisis del impacto de las pérdidas de frutas y vegetales en términos biofísicos: caso de estudio mercado mayorista de la ciudad de Quito». En: *Escuela Biotécnica Nacional* (2020).
- [6] Tim Motis y Stacy Swartz. *Prolongar la vida poscosecha de la fruta fresca*. 2022. URL: <https://www.echocommunity.org/es/resources/>.
- [7] Office of Assistant Director-General (Agriculture Department). «Las pérdidas y el desperdicio de alimentos en el contexto de sistemas alimentarios sostenibles». En: *CSA* (2014).
- [8] Edgar Roa Guerrero Diego Escobar Figueroa. «Sistema de visión artificial para la identificación del estado de madurez de frutas (granadilla)». En: *Redes de Ingeniería* (2016).
- [9] JIMÉNEZ BUILES y JOVANI ALBERTO ROMERO ACERO ALVARO MARÍN CANO ALEJANDRO. «Sistema de clasificación por visión artificial de mangos tipo Tommy». En: *Revista UIS Ingeniería* (2015).

- [10] Seipasa. *Maduración de frutas y hortalizas: cuándo y por qué es importante homogeneizarla y anticiparla*. 2020. URL: <https://www.seipasa.com/es/blog/claves-en-la-maduración-de-frutas-y-hortalizas/#:~:text=Es%20un%20proceso%20determinante%2C%20ya,el%20momento%20de%20la%20cosecha>.
- [11] Tim Motis y Stacy Swartz. *Prolongar la vida postcosecha de la fruta fresca*. 2022. URL: <https://www.echocommunity.org/es/resources/>.
- [12] Naciones Unidas. *Objetivos de desarrollo sostenible*. 2015. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [13] Fabio Solanilla y José Carlos Rangel Andrea Villalba Tomás Requena. *Prototipo de un sistema que determine el estado de madurez de un plátano utilizando Deep Learning y Visión Artificial*. 2021. URL: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/3155>.
- [14] Gabriela Viera-Maza. «PROCESAMIENTO DE IMÁGENES USANDO OPENCV APLICADO EN RASPBERRY PI PARA LA CLASIFICACIÓN DEL CACAO». En: *Online* (2017).
- [15] Álvaro Andrés Navarro Pérez Olga Lucía Torres Vargas. *Implementación de un Sistema de Visión Artificial para la clasificación de naranja producida en el departamento del Quindío*. 2018. URL: <https://alimentosyhoj.acta.org.co/index.php/hoj/article/view/498>.
- [16] José Orlando Castaño García Miguel Ángel Escobar Peláez. «DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE MADUREZ DEL AGUACATE MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES CON LA RASPBERRY PI». En: *Online* (2018).
- [17] Medina Tobón Daniel. «Conteo de flores y frutos para el monitoreo del cultivo de aguacate Hass por medio de imágenes utilizando Machine Learning». En: *Online* (2021).
- [18] EDGAR ANDRE MANZANO RAMOS. «Sistema de visión artificial basado en redes neuronales convolucionales para la selección de arándanos según estándares de exportación». En: *Online* (2021).
- [19] Cabrera Rosero Jairo Andrés y Lascano Rivera Samuel Rosero Acosta Noreen Odalys. *Detección de enfermedades en cultivos de papa usando procesamiento de imágenes*. En: *Online* (2020).

- [20] Jesús Escobedo Gómez y Baby Elder Cruz Diaz. «Desarrollo de un algoritmo de visión artificial para el reconocimiento de la pera de agua en fase optima en su recolección aplicado en industria». En: <https://doi.org/10.18050/ingnosis.v8i1.2826> (2022).
- [21] Carla Michelle Merchán Moncayo Johnny Arturo Baque Carvallo. «Diseño de un sistema automatizado para clasificar frutas y verduras para banco de alimentos». En: *Online* (2022).
- [22] Yun Wang y Guigang Zhang Xueqing Zhao Yifan Feng. «Un método de clasificación de flores basado en la constancia del color». En: *Online* (2023).
- [23] Lenin Andrés Castro Martin Ana Pamela Gutiérrez Sánchez. «Sistema inteligente de selección de cosecha en cultivo de pitahaya mediante visión artificial». En: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/> (2024).
- [24] Br. Joseph Junior Jacinto Paredes y Br. Wilson Edward Yoel Narro Esquivel. «Sistema de visión artificial en la determinación del momento de cosecha de la Maracuyá en el distrito de Laredo». En: <https://hdl.handle.net/11537/22499e>. (2019).
- [25] Decco Ibérica Post Cosecha, S.A. Cada fruta en su lugar. [https://www.personal.unam.mx/Docs/Cendi/cada fruta en su lugar.pdf](https://www.personal.unam.mx/Docs/Cendi/cada_fruta_en_su_lugar.pdf). (2021)
- [26] Procomer. Manual técnico cosecha de Maracuyá. <https://www.procomer.com/wp-content/uploads/Manual-de-cosecha-maracuy%C3%A1.pdf>. (2022)
- [27] Strikingly. Lightbox Photography para Principiantes: Guía Paso a Paso. <https://www.strikingly.com/blog/posts/lightbox-photography-for-beginners-step-by-step-guide>. (2023)
- [28] Iberdrola. ¿Qué es la visión artificial y cuáles son sus aplicaciones? <https://www.iberdrola.com/innovacion/vision-artificial#:~:text=La%20visi%C3%B3n%20artificial%20es%20una,actuar%20de%20una%20manera%20determinada>. (2024)

- [29] Vistrónica. Procesamiento de imágenes.
<https://www.vistronica.com/blog/post/procesamiento-de-imagenes.html#:~:text=La%20imagen%20puede%20haber%20sido,m%C3%A9todos%20digitales%2C%20en%20una%20computadora.>
 (2020)
- [30] IMD DEVELOPER. ¿Qué es la segmentación de imágenes?
<https://www.ibm.com/mx-es/topics/image-segmentation#:~:text=La%20segmentaci%C3%B3n%20de%20im%C3%A1genes%20es,de%20objetos%20y%20tareass.>
 s. (2022).
- [31] AQINSTRUMENTS. La colorimetría y sus aplicaciones.
<https://www.aquateknica.com/la-colorimetria-y-sus-aplicaciones/#:~:text=La%20colorimetr%C3%ADa%20es%20la%20ciencia,la%20curva%20espectral%20del%20color.> (2024).
- [32] G. Acevedo, "Detección de objetos por colores en imágenes con Python y OpenCV," Medium, 23-sep-2019. [En línea]. Disponible en:
<https://medium.com/@gastonace1/detecci%C3%B3n-de-objetos-por-colores-en-im%C3%A1genes-con-python-y-opencv-c8d9b6768ff#:~:text=El%20espacio%20de%20color%20HSV,en%20funci%C3%B3n%20de%20su%20color.> (15-oct-2024).
- [33] AMAZON. Cámara digital. [https://www.amazon.com/-/es/digitales-antivibraci%C3%B3n-fotograf%C3%ADa-adolescentes-principiantes/dp/B0D5B19S22/ref=sr_1_18?mk es US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&sr=8-18](https://www.amazon.com/-/es/digitales-antivibraci%C3%B3n-fotograf%C3%ADa-adolescentes-principiantes/dp/B0D5B19S22/ref=sr_1_18?mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&sr=8-18). (2024).
- [34] R. C. González and R. E. Woods, Digital Image Processing, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, 2008.