



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Perfecta combinación entre Energía e Intelecto



**SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA INSPECCIÓN,  
SELECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE FRESAS.**

Hugo Fernando Sánchez Martínez  
Ana Ruth Morales García

*Universidad Industrial de Santander  
Faculta de Ingenierías Físico - Mecánicas  
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
Bucaramanga  
2009*

SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA INSPECCIÓN,  
SELECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE FRESAS.

Hugo Fernando Sánchez Martínez  
Ana Ruth Morales García

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director  
Mg. Jaime Guillermo Barrero Pérez

Codirector  
Dr. Arturo Plata Gómez

*Universidad Industrial de Santander*  
*Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones*  
*Bucaramanga*  
*2009*

*A mi madre Marina y a mi hermana Mirtza Stella*

*Hugo*

*A mi madre Gladys y a mi hermano Jairo*

*Ana*

## **AGRADECIMIENTOS**

Expresamos nuestro agradecimiento al director del proyecto, Mg. Jaime Guillermo Barrero Pérez, quien nos tendió su mano desde el principio y encaminó nuestra idea, así mismo al codirector del proyecto, Dr. Arturo Plata Gómez, quien creyó en nosotros y orientó en el desarrollo de este trabajo.

Los Autores

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> . . . . .	.1
<b>1. PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA FRESA VARIEDAD CHANDLER</b> . . . . .	.4
1.1 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4103 . . . . .	.4
1.1.1 Requisitos generales . . . . .	.5
1.1.2 Clasificación . . . . .	.6
1.1.2.1 Categoría extra . . . . .	.6
1.1.2.2 Categoría I . . . . .	.6
1.1.2.3 Categoría II . . . . .	.7
1.1.3 Calibre . . . . .	.8
1.1.4 Requisitos de madurez . . . . .	.8
1.2 ANÁLISIS DE CALIBRADO Y LA CALIDAD INTERNA DE LA FRESA VARIEDAD CHANDLER . . . . .	.9
1.2.1 Análisis de calibrado . . . . .	.10
1.2.2 Análisis de la calidad interna . . . . .	.11
1.2.2.1 Contenido de azúcar . . . . .	.12
1.2.2.2 Contenido de acidez . . . . .	.13
1.2.2.3 Índice de madurez . . . . .	.14
<b>2. VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE FRESAS</b> . . . . .	.16
2.1 LA VISIÓN ARTIFICIAL Y SU UTILIDAD EN EL CONTROL DE CALIDAD . . . . .	.16
2.2 PROTOTIPO DE VISIÓN ARTIFICIAL PROPUESTO PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE FRESAS . . . . .	.17
<b>3. SISTEMA DE ILUMINACIÓN Y ADQUISICIÓN DE LAS IMÁGENES</b>	.20
3.1 ILUMINACIÓN . . . . .	.20

3.1.1	Tipos de reflexión	.20
3.1.2	Tipos de Iluminación	.21
3.2	SISTEMA DE ILUMINACIÓN ELEGIDO	.23
3.3	FUENTES LUMINOSAS	.24
3.4	FUENTE DE LUZ SELECCIONADA	.26
3.5	ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DEL SISTEMA	.26
3.5.1	Modelo de Captura de Imágenes	.27
3.5.1.1	El Modelo De Lente Fina (cámara oscura)	.27
3.5.2	La Digitalización	.28
3.5.2.1	Muestreo	.28
3.5.2.2	Cuantización	.29
3.6	CÁMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL	.30
3.7	CANON POWERSHOT A430	.31
3.8	PROTOTIPO DE ILUMINACIÓN IMPLEMENTADO	.33
3.9	CONFIGURACIÓN DE LA CÁMARA POWERSHOT A430 Y TOMA DE IMÁGENES	.34
<b>4.</b>	<b>PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES ADQUIRIDAS</b>	<b>.41</b>
4.1	SEGMENTACIÓN	.41
4.2	EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS E INTERPRETACIÓN	.52
4.2.1	Detección de defectos superficiales	.52
4.2.1.1	Detección de defectos claros	.53
4.2.1.2	Detección de defectos oscuros	.54
4.2.2	Detección de defectos de forma en el Ápice de la fresa	.57
4.2.3	Determinación del grado de madurez de la fresa	.63
4.2.4	Determinación del calibre de la fresa	.67
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>.70</b>
5.1	EJEMPLO DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	.70
5.2	CLASIFICACIÓN SEGÚN LA CATEGORÍA DE LA FRESA	.75
5.3	CLASIFICACIÓN SEGÚN EL ESTADO DE MADUREZ DE LA FRESA	.78

5.4	CLASIFICACIÓN SEGUN EL CALIBRE DE LA FRESA	.	.	.	.	.	.	.	.82
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	.	.	.	.	.	.	.	.86
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	.	.	.	.	.	.	.	.88
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	.	.	.	.	.	.	.	.89
	<b>ANEXOS</b>	.	.	.	.	.	.	.	.91

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Categoría extra . . . . .	.6
Figura 2. Categoría I . . . . .	.7
Figura 3. Categoría II . . . . .	.7
Figura 4. Tabla de color de la fresa variedad Chandler . . . . .	.9
Figura 5. Comportamiento de la longitud y el diámetro mayor respecto al peso . . . . .	.10
Figura 6. Distribución de frecuencia por calibres . . . . .	.11
Figura 7. Intervalos de confianza para el promedio de las variables asociadas a la calidad interna de la fresa respecto a los sistemas de siembra . . . . .	.11
Figura 8. Intervalos de confianza para el promedio de las variables asociadas a la calidad interna de la fresa respecto a la edad del cultivo . . . . .	.12
Figura 9. Intervalos de confianza para el promedio de las variables asociadas a la calidad interna de la fresa respecto al calibre . . . . .	.12
Figura 10. Intervalos de confianza para el promedio del contenido de azúcar por color . . . . .	.13
Figura 11. Intervalos de confianza para el promedio del contenido de acidez por color. . . . .	.14
Figura 12. Relación del contenido de azúcar y contenido de acidez por color . . . . .	.14
Figura 13. Diagrama general del prototipo puesto . . . . .	.19
Figura 14. Tipos de reflexión . . . . .	.21
Figura 15. Esquema típico de CDI . . . . .	.24
Figura 16. Cámara digital del sistema . . . . .	.31
Figura 17. Prototipo de adquisición de imágenes del sistema . . . . .	.33

Figura 18. Prototipo de adquisición construido . . . . .	.34
Figura 19. Imagen en modo automático . . . . .	.35
Figura 20. Selección de píxeles y nivel de compresión . . . . .	.36
Figura 21. (a) Imagen en modo Normal, (b) imagen en modo Macro . . . . .	.36
Figura 22. Selección de balance de blancos . . . . .	.37
Figura 23. (a) Imagen AWB auto, (b) imagen personalizada . . . . .	.37
Figura 24. Selección modo Mis colores . . . . .	.38
Figura 25. Imágenes finalmente adquiridas . . . . .	.39
Figura 26. Cubo RGB . . . . .	.42
Figura 27. Representación bicónica del modelo HSI . . . . .	.44
Figura 28. (a) Imagen en RGB, (b) Imagen en HSI . . . . .	.45
Figura 29. (a) Histograma del canal S, (b) Histograma del canal S, (c) Histograma del canal I . . . . .	.45
Figura 30. Fresa segmentada del fondo . . . . .	.47
Figura 31. (a) Imagen original, (b) Segmentación con intervalo de umbralización $0.229 \leq T \leq 0.71$ , (c) Segmentación con intervalo de umbralización $0.2 \leq T \leq 0.71$ , (d) Segmentación con intervalo de umbralización $0.25 \leq T \leq 0.71$ . . . . .	.48
Figura 32. Aplicación de apertura a una imagen . . . . .	.49
Figura 33. (a) Imagen segmentada del fondo, (b) Imagen después de la aplicación de apertura . . . . .	.50
Figura 34. (a) Imagen resultante después de la apertura, (b) Imagen obtenida después de reducir áreas inferiores a 1000 píxeles . . . . .	.51
Figura 35. (a) Imagen de entrada original en RGB, (b) Imagen segmentada en el modelo HSI, (c) Imagen equivalente de (b) en el modelo RGB . . . . .	.51
Figura 36. Defecto blanco en las fresas . . . . .	.53
Figura 37. (a) Imagen de entrada, (b) Canal S de la imagen segmentada, (c) Defecto blanco detectado . . . . .	.54
Figura 38. Fresas con deficiencia de Boro . . . . .	.55

Figura 39. (a)Fresa con defecto oscuro, (b) Defecto detectado	.56
Figura 40. (a) Fresa con áreas sobre maduras, (b) Defecto detectado	.56
Figura 41. (a) Fresa con deficiencia de Boro, (b) Defecto detectado	.57
Figura 42. (a) Objeto circular y su signatura, (b) Objeto cuadrado y su Signatura	.58
Figura 43. (a) Imagen binaria de una fresa segmentada, (b) Borde de (a)	.59
Figura 44. (a) Borde detectado y centroide para una fresa sin deformación en el ápice, (b) Signatura de (a), (c) Borde detectado y centroide para una fresa con deformación en el ápice, (d) Signatura de (c)	.60
Figura 45. (a) Fresa sin deformación, (b) Signatura de (a), (c) Fresa sin deformación, (d) Signatura de (c), (e) Fresa con deformación, (f) Signatura de (e), (g) Fresa con deformación, (h) Signatura de (g)	.61
Figura 46. (a) Fresa segmentada, (b) Histograma del canal H para la representación en HSI de (a), (c) Fresa segmentada, (d) Histograma del canal H para la representación en HSI de (c)	.64
Figura 47. (a) Imagen de entrada, (b) Segmentación de la región roja de (a), (c)Imagen de entrada, (d) Segmentación de la región roja de (c)	.66
Figura 48. (a) Imagen binaria de la fresa segmentada, (b) Mínimo rectángulo que contiene la región de la fresa	.68
Figura 49. Imagen de entrada	.70
Figura 50. Imagen segmentada	.71
Figura 51. Borde y centroide de la fresa segmentada	.72
Figura 52. Signatura de la fresa	.72
Figura 53. Área madura de la fresa	.73
Figura 54. Rectángulo mínimo que contiene la región de la fresa	.74

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Calibre de la fresa variedad Chandler . . . . .	.8
Tabla 2. Contenido de sólidos solubles totales de acuerdo con la tabla de color . . . . .	.13
Tabla 3. Acidez titulable de acuerdo con la tabla de color . . . . .	.13
Tabla 4. Índice de madurez mínimo de acuerdo con la tabla de color . . . . .	.15
Tabla 5. Especificaciones técnicas PowerShot A430 . . . . .	.32
Tabla 6. Clasificación según la categoría de la fresa . . . . .	.75
Tabla 7. Clasificación del estado de madurez de la fresa . . . . .	.78
Tabla 8. Clasificación según el calibre de la fresa . . . . .	.82

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. DIAGRAMAS DE FLUJO DEL SISTEMA . . . . .	.91
Anexo B. VISIÓN HUMANA Y VISIÓN ARTIFICIAL . . . . .	.96
Anexo C. CONTROL DE CALIDAD EN EL SECTOR HORTIFRUTÍCOLA. . . . .	122

## RESUMEN

### TÍTULO:

SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA INSPECCIÓN, SELECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE FRESAS<sup>1</sup>

**AUTORES:** Hugo Fernando Sánchez Martínez y Ana Ruth Morales García<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Procesamiento digital de imágenes, Espacio de color, Umbralización, fresa, Norma Técnica Colombiana NTC 4103, signatura, Iluminación de Día Nublado.

### DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se muestra el desarrollo de un sistema de visión que, utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes, permite determinar la calidad en fresas, desechando las que no son aptas para el consumo en fresco y clasificando las que sí lo son según su categoría, estado de maduración y calibre de acuerdo a lo contemplado en la norma NTC 4103 del ICONTEC. El sistema es desarrollado en MATLAB<sup>®</sup> en su versión 7.4.

El sistema trabaja sobre imágenes previamente adquiridas utilizando para su captura la cámara fotográfica Canon Powershot A430, y un sistema de iluminación de tipo Día Nublado con leds como fuentes de luz. El procesamiento de estas imágenes tiene como primer paso la segmentación de la fresa del fondo para lo cual se aplica el método de umbralización trabajando en el canal H del modelo de color HSI. Posteriormente se realiza la extracción de características para la clasificación de la fresa donde se llega a detectar la presencia de diferentes tipos de defectos superficiales gracias a que las propiedades de color que dichas imperfecciones presentan permiten diferenciarlos del resto de la fresa. También se establece si la fresa presenta defectos en la forma de su ápice aplicando para esto el método de la signatura. Además se determina el grado de maduración de la fresa separando la región correspondiente al área madura gracias a la caracterización del color propio de esta zona, y midiendo el porcentaje que representa respecto al área total del fruto. Se realiza también la medición del diámetro máximo (cercano al cáliz) de la fresa estableciendo previamente la relación correspondiente entre pixeles y milímetros.

El sistema se pone a prueba aplicándolo a 100 imágenes de fresas con diferentes características determinando su grado de efectividad.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director Mg. Jaime Guillermo Barrero Pérez. Codirector Dr. Arturo Plata Gómez.

## ABSTRACT

**TITTLE:**

ARTIFICIAL VISION SYSTEM FOR INSPECTION, SELECTION AND QUALITY OF STRAWBERRIES<sup>3</sup>

**AUTHORS:** Hugo Fernando Sánchez Martínez y Ana Ruth Morales García<sup>4</sup>

**KEY WORDS:** Digital Image Processing, Color spaces, Thresholding, Strawberry, Colombian Technical Standard NTC 4103, signature, Cloudy Day Illumination.

**CONTENT:**

This paper shows the development of a vision system, which using techniques of digital image processing, to determine the quality of strawberries, discarding those that are not suitable for fresh consumption and classify those that are appropriate by category, degree of ripeness and size according to the standard ICONTEC NTC 4103. The system is developed in MATLAB ® version 7.4.

The system works on previously acquired images captured using the Canon Powershot A430 camera and an illumination system type Cloudy Day with LEDs as light sources. The processing of these images begins, with the segmentation of the strawberry from the background using the thresholding method and working on the H component of HSI color model. Subsequently performs feature extraction for classification of strawberries which will detect the presence of different types of surface defects due to the color properties of these imperfections allows distinguishing them from the rest of the strawberry. The system also establishes whether the strawberry has defects on its apex shape by applying the Signature method. Besides, the system determines the degree of ripeness of the strawberry separating the region corresponding to the ripe area through the characterization of the color of this zone, and measuring the percentage that represents of the total area of the fruit. It also makes the measurement of maximum diameter (near the calyx) of strawberries with the ratio established beforehand between pixels and millimeters.

The system is tested by applying it to 100 images of different kind of strawberries, for determining their effectiveness.

---

<sup>3</sup> Degree project

<sup>4</sup> Physics Mechanical Engineering Faculty. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director Mg. Jaime Guillermo Barrero Pérez. Co director Dr. Arturo Plata Gómez.

## INTRODUCCIÓN

El sector hortifrutícola se ha considerado como una opción importante en la generación de ingresos para un grupo significativo de la población en Colombia que se dedica a diversas actividades entre las que se encuentran la producción, comercialización y transformación de frutas y hortalizas.

Un aspecto fundamental para el reconocimiento del país como productor es la calidad de los productos pues en la medida en que ésta se incrementa se logra una mayor aceptación y satisfacción del consumidor. Para el sector hortifrutícola, la calidad se ve afectada por factores tales como la apariencia, la sanidad, la inocuidad y el estado de madurez el cual se puede evidenciar por cambios en el contenido de azúcar y el contenido de acidez así como cambios en el color y aspecto de la fruta. Debido a esto se hace imprescindible contar con una adecuada etapa de inspección para la totalidad de una producción, asegurando que ésta llegue al cliente cumpliendo unas determinadas normas de calidad.

Los sistemas de visión artificial son una alternativa rentable y segura para realizar este tipo específico de inspección visual, sobre todo por tratarse de una actividad de carácter monótono y de alta velocidad. Una combinación armoniosa entre un adecuado sistema de iluminación y adquisición, técnicas de procesamiento digital de imágenes e investigaciones en el sector hortifrutícola puede llegar a extraer información valiosa que permita controlar automáticamente un proceso de control de calidad.

En este documento se muestra el desarrollo de un sistema el cual, por medio de algoritmos para el procesamiento digital de imágenes, logra inspeccionar y clasificar distintas fresas teniendo en cuenta para esto los parámetros para

el control de calidad en fresas establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 4103 del ICONTEC.

El documento inicia con un primer capítulo donde se presenta la Norma NTC 4103 con los requerimientos establecidos en ella para el consumo en fresco de la fresa. Se muestran las características que debe cumplir la fresa para realizar su clasificación por Categorías, Madurez y Calibre. También se presenta un breve análisis de la relación existente entre la apariencia externa de la fresa y su calidad interna.

A continuación, en el segundo capítulo, se expone un poco sobre la utilidad de la visión artificial para el control de calidad en el sector agroindustrial a la vez que se presenta una descripción general del prototipo del sistema de visión propuesto en este trabajo.

En el tercer capítulo se encuentra el comienzo del sistema de visión cuya primera etapa es el sistema de iluminación y adquisición de las imágenes. Aquí se ilustra el sistema de iluminación empleado para este trabajo y también se presenta una explicación detallada de la forma en que se configura la cámara utilizada en la adquisición de las imágenes, siendo estos dos aspectos de suma importancia para la captura de imágenes adecuadas para el procesamiento posterior, lo que también es un objetivo de este trabajo.

En seguida, en el cuarto capítulo el lector encontrará el procesamiento que se le aplica a las imágenes, el cual comprende la segmentación y la forma en que se extraen las características que sirven de base para la clasificación de las fresas, como son los defectos presentes en ellas tanto en su superficie como en su forma, su estado de maduración y su calibre.

En el capítulo quinto se presentan los resultados que obtiene el sistema desarrollado sobre 100 fresas con diversas características y se contrastan con los obtenidos por medio de una inspección humana.

Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo y las recomendaciones para trabajos futuros. El sistema es desarrollado sobre el ambiente de computo MATLAB® de MathWorks™, así que además se incluye un anexo dentro del cual se encuentran los diagramas de flujo que ilustran el funcionamiento de los scripts realizados.

## **1. PARÁMETROS DE CALIDAD DE LA FRESA VARIEDAD CHANDLER**

En Colombia, el principal departamento productor de fresa es Cundinamarca, seguido de Cauca, Norte de Santander y Boyacá [9]. El documento que permite estimar y evaluar las características de calidad de la Fresa Variedad Chandler es la Norma Técnica Colombiana (NTC) 4103. A continuación se amplía un poco el contenido de esta norma.

### **1.1 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4103**

El desarrollo del presente proyecto está basado en los aspectos contemplados por esta norma, la cual tiene como objeto establecer los requisitos que debe cumplir la fresa variedad Chandler, destinada para el consumo fresco o como materia prima para el procesamiento.

La norma establece las siguientes definiciones [6]:

- Pedúnculo: tallo del fruto.
- Ápice: parte opuesta al pedúnculo.
- Cáliz: verticilo externo de la envoltura floral que se compone de sépalos u hojas florales generalmente verdes y de consistencia herbácea.
- Frutos no climatéricos: se refiere a los productos que al ser cosechados, presentan una disminución de la tasa de respiración, ocasionando cambios poco notorios principalmente en los contenidos de azúcares y ácidos.

### **1.1.1 Requisitos Generales.**

Según se puede encontrar en la Norma Técnica Colombiana 4103, la fresa variedad Chandler debe cumplir, las siguientes características físicas [6]:

- Los frutos deben estar enteros.
- Deben tener la forma característica de la fresa variedad Chandler.
- Deben estar sanas (libres de ataques de insectos y/o enfermedades, que demeriten la calidad interna del fruto).
- Deben estar libres de humedad externa anormal producida por mal manejo en las etapas poscosecha (recolección, acopio, selección, clasificación, adecuación, empaque, almacenamiento y transporte).
- Deben estar exentas de cualquier olor y/o sabor extraño (provenientes de otros productos, empaques o recipientes y/o agroquímicos con los cuales hayan estado en contacto).
- Deben presentar aspecto fresco y consistencia firme.
- Deben estar exentas de materiales extraños (tierra, polvo, agroquímicos y cuerpos extraños) visibles en el producto o en su empaque.
- Para el mercado fresco, los frutos deben tener cáliz y pedúnculo bien adheridos al fruto, además deben ser de color verde y presentar aspecto fresco.
- El pedúnculo debe medir de 8 a 10mm de longitud.

- La coloración de los frutos debe ser homogénea dependiendo del estado de madurez definido en la tabla de color (véase la Figura 4).

### 1.1.2 Clasificación

La norma establece tres categorías de fresa independientemente del calibre y color. Las categorías son las siguientes [6]:

**1.1.2.1 Categoría extra.** La fresa debe cumplir los requisitos generales definidos en el numeral 3.1.1 y estar exenta de todo defecto que demerite la calidad del fruto (véase la Figura 1).

Figura 1. Categoría extra.



Fuente: Norma técnica Colombiana 4103.

**1.1.2.2 Categoría I.** La fresa debe cumplir los requisitos generales definidos en el numeral 3.1.1 y se acepta lo siguiente (véase la Figura 2):

- Leve deformación causada por una mala polinización.
- Cicatrices superficiales ocasionadas por insectos y/o ácaros. Estos defectos en conjunto no deben exceder el 10% del área total del fruto.

Figura 2. Categoría I.



Fuente: Norma técnica Colombiana 4103.

**1.1.2.3 Categoría II.** Comprende la fresa que no puede clasificarse en las categorías anteriores pero cumple los requisitos generales definidos en el numeral 3.1.1. Se admiten los siguientes defectos (véase la Figura 3):

- Deformación del ápice del fruto.
- Cicatrices ocasionadas por ácaros y manchas causadas por deficiencia de boro. Estos defectos en conjunto no deben exceder el 20% del área total del fruto.

Figura 3. Categoría II.



Fuente: Norma técnica Colombiana 4103.

### 1.1.3 Calibre

Se determina midiendo el diámetro máximo (cercano al cáliz) de cada fruto, con un calibrador o con una plantilla con círculos de los diferentes diámetros. El resultado se expresa en milímetros (mm) obteniendo los rangos indicados en la siguiente escala:

Tabla 1. Calibre de la fresa variedad Chandler.

Diámetro (mm)	Calibre	Peso promedio (g)
≥ 34	A	21.8
33 – 30	B	16.1
29 - 25	C	11.7
24 - 21	D	8.0
≤ 20	E	5.3

Fuente: Norma técnica Colombiana 4103.

### 1.1.4 Requisitos de madurez

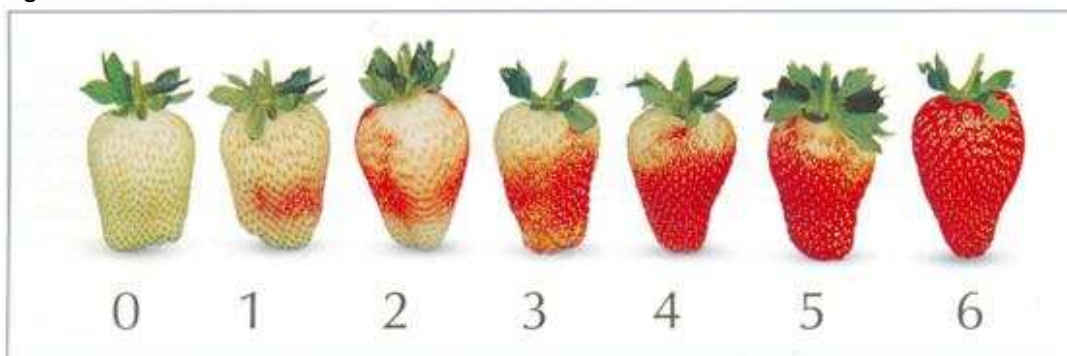
El color externo de la fresa variedad Chandler permite apreciar visualmente su madurez. Su estado se puede confirmar por medio de la determinación de los sólidos solubles totales, acidez titulable y el índice de madurez.

Teniendo en cuenta que la fresa inicia su madurez desde el ápice hacia el cáliz (véase Figura 4), la siguiente es la descripción establecida por la norma, que relaciona los cambios de color con los diferentes estados de madurez:

- COLOR 0: Fruto de color blanco verdoso bien desarrollado.
- COLOR 1: El fruto es de color verdoso con algunas áreas de color rojo en la zona apical.

- COLOR 2: Aumenta el área de color rojo en la zona apical.
- COLOR 3: El color rojo cubre hasta la zona media del fruto y la zona del cáliz presenta visos rosados.
- COLOR 4: Aumenta el área de color rojo hacia la zona del cáliz.
- COLOR 5: La intensidad del color rojo aumenta y empieza a cubrir la región cercana al cáliz.
- COLOR 6: El color rojo es intenso y cubre toda la fruta.

Figura 4. Tabla de color de la fresa variedad Chandler.



Fuente: Norma Técnica Colombiana 4103.

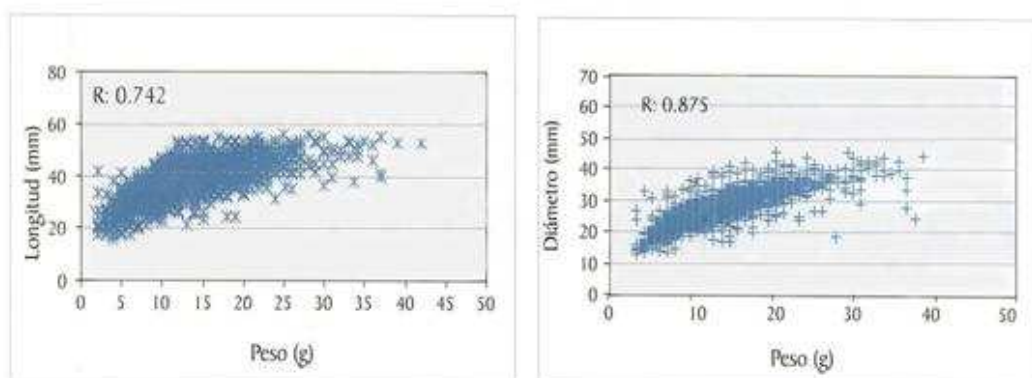
## 1.2 ANÁLISIS DE CALIBRADO Y DE LA CALIDAD INTERNA DE LA FRESA VARIEDAD CHANDLER

A continuación se muestran algunos resultados de estudios realizados en los departamentos de Cundinamarca y Antioquia, en los cultivos más representativos de la producción [5].

### 1.2.1 Análisis de calibrado.

Observando la relación del diámetro mayor y la longitud con respecto al peso que se aprecia en la Figura 5, se puede concluir que los frutos en su mayoría son más largos que anchos puesto que los valores de longitud son mayores.

Figura 5. Comportamiento de la longitud y el diámetro mayor respecto al peso.

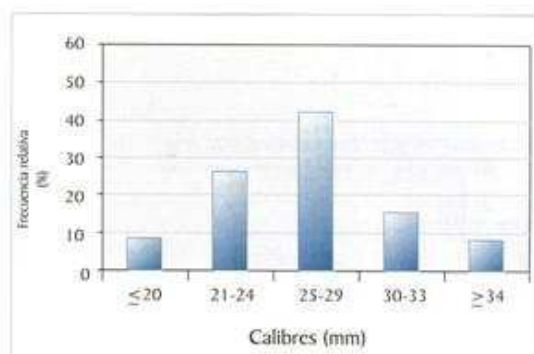


Fuente: Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad.

La fresa presenta una variación de tamaños entre 13mm y 46 mm de diámetro mayor, 15mm y 68 mm de longitud con pesos comprendidos entre 2g y 38g. Para su comercialización es importante definir los calibres (rangos de tamaño), que son establecidos con base en el diámetro mayor (ver Tabla 1).

Al analizar la producción general se destaca, como se aprecia en la Figura 6, que la mayor cantidad de fruta se acumula en los calibres entre 21mm y 29mm con 58.5%. Frutos con diámetro mayor a 30mm representan el 23.2% de la producción.

Figura 6. Distribución de frecuencia por calibres.

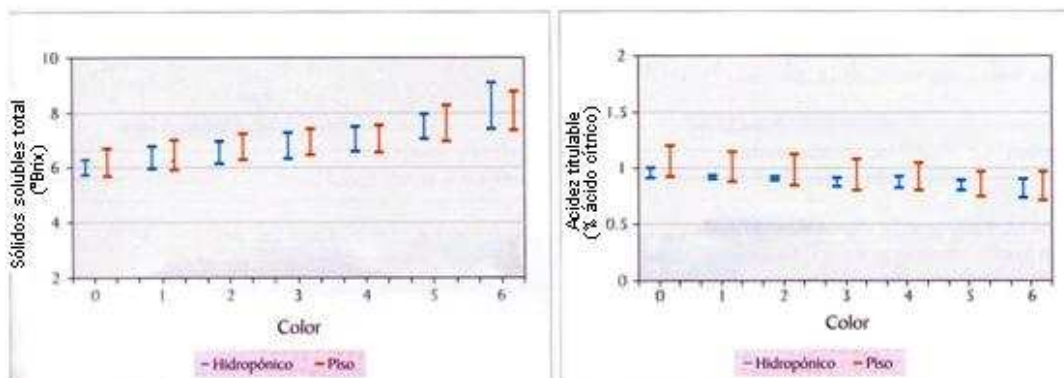


Fuente: Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad.

### 1.2.2 Análisis de la calidad interna.

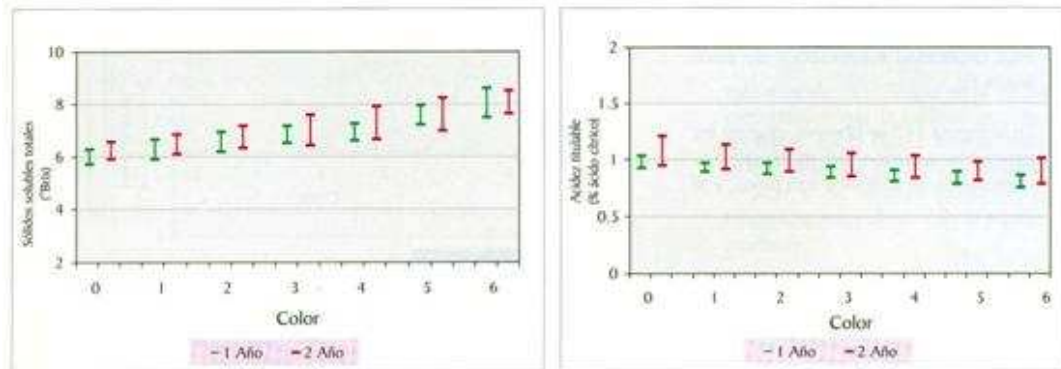
Al estudiar la calidad interna respecto a los sistemas de siembra, la edad del cultivo y los calibres (Figuras 7, 8 y 9) y teniendo en cuenta la tabla de color para la fresa (Figura 4), se puede concluir que los promedios de las características de calidad no se ven influenciadas por ninguna de estas variables.

Figura 7. Intervalos de confianza para el promedio de las variables asociadas a la calidad interna de la fresa respecto a los sistemas de siembra.



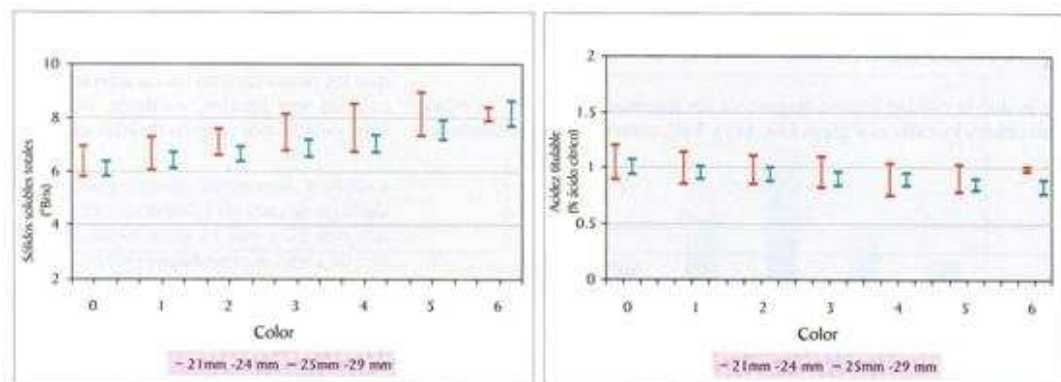
Fuente: Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad.

Figura 8. Intervalos de confianza para el promedio de las variables asociadas a la calidad interna de la fresa respecto a la edad del cultivo.



Fuente: Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad.

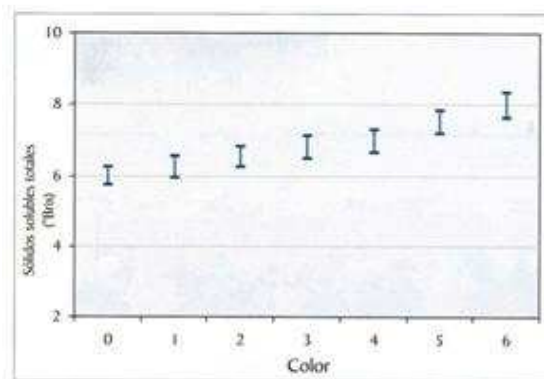
Figura 9. Intervalos de confianza para el promedio de las variables asociadas a la calidad interna de la fresa respecto al calibre.



Fuente: Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad.

**1.2.2.1 Contenido de azúcar.** En la Figura 10 es posible observar que en las primeras etapas de madurez, los contenidos de azúcares son bajos y a medida que avanza la maduración su contenido aumenta. En la tabla 2 se muestran los valores máximos y mínimos del contenido de sólidos solubles expresado en grados Brix de acuerdo con la Tabla de Color.

Figura 10. Intervalos de confianza para el promedio del contenido de azúcar por color.



Fuente: Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad.

Tabla 2. Contenido de sólidos solubles totales de acuerdo con la tabla de color.

COLOR	0	1	2	3	4	5	6
LI (°Brix)	6.0	6.3	6.5	6.8	6.9	7.4	7.9
LS (°Brix)	6.5	6.8	7.1	7.3	7.5	8.1	8.5

Fuente: Norma técnica Colombiana 4103.

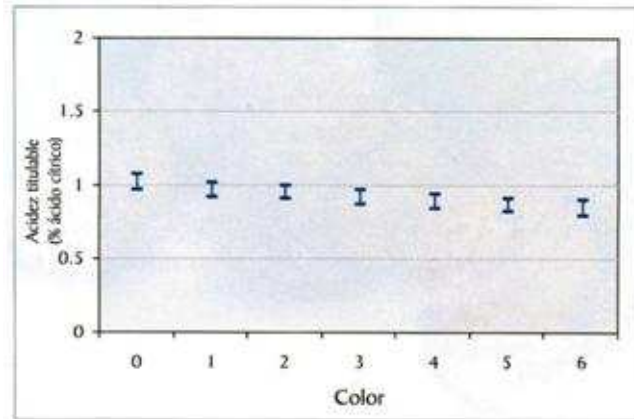
**1.2.2.2 Contenido de acidez.** En la Figura 11 se aprecia que durante la maduración de la fresa no se identifican diferencias relevantes entre los colores. El límite superior para el promedio independientemente del estado de madurez es 1,07% de ácido cítrico. Los valores mínimos y máximos del porcentaje de ácido cítrico que presenta cada uno de los estados identificados en la tabla de color son los siguientes:

Tabla 3. Acidez titulable de acuerdo con la tabla de color.

Color	0	1	2	3	4	5	6
%Acido cítrico (mínimo)	0.95	0.91	0.90	0.86	0.83	0.82	0.78
%Acido cítrico (máximo)	1.07	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.89

Fuente: Norma Técnica Colombiana 4103.

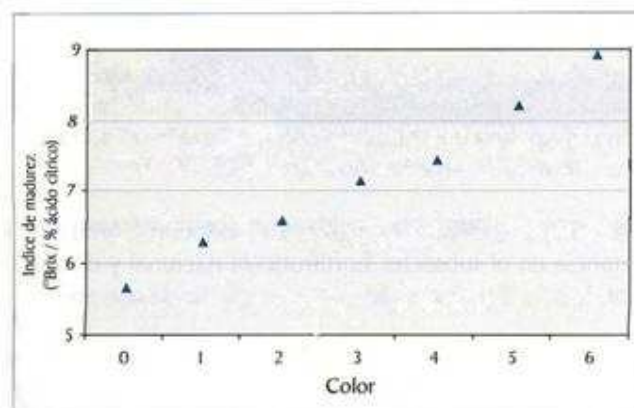
Figura 11. Intervalos de confianza para el promedio del contenido de acidez por color.



Fuente: Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad.

**1.2.2.3 Índice de madurez.** En la industria, esta relación es usada para determinar la calidad interna de las frutas. Tal como se observa en la Figura 12, la relación en los contenidos de azúcar y de acidez presenta un comportamiento ascendente con el estado de madurez.

Figura 12. Relación del contenido de azúcar y contenido de acidez por color.



Fuente: Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianas y establecimiento de las normas técnicas de calidad.

Tabla 4. Índice de madurez mínimo de acuerdo con la tabla de color.

Color	0	1	2	3	4	5	6
°Bx/%Acido cítrico	5.7	6.2	6.6	7.1	7.4	8.2	8.9

Fuente: Norma técnica Colombiana 4103.

## **2. VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE FRESAS**

### **2.1 LA VISIÓN ARTIFICIAL Y SU UTILIDAD EN EL CONTROL DE CALIDAD**

Es evidente que la visión es uno de los sentidos más importantes y a la vez complejos del ser humano. La mayor parte de la información que recibe el hombre es captada por medio del sistema de visión lo que hace de la percepción visual un elemento de gran importancia para los procesos humanos de aprendizaje y resolución de problemas. De aquí el interés del hombre por proveer de esta capacidad visual a una máquina para que ésta logre realizar tareas que puedan resultar extenuantes y, en algunos casos, difíciles de efectuar por el ser humano. Es por esto que surge la Visión Artificial.

La visión artificial pretende obtener información del mundo físico a partir de imágenes, utilizando para este objetivo un computador. Intenta, utilizando algoritmos de procesamiento, extraer y medir determinadas propiedades de las imágenes adquiridas. Las propiedades que pretende evaluar incluyen no solo propiedades geométricas como forma, tamaño y localización de objetos, sino también, propiedades materiales como color, iluminación, textura y composición.

Dentro de las múltiples aplicaciones de la visión artificial se destaca, en este proyecto, su utilidad en el campo industrial, más concretamente en el sector agroindustrial. En este campo se podría decir, en términos generales, que la visión artificial involucra la adquisición de la imagen de un objeto predeterminado en la línea de producción y su procesamiento con el objetivo de identificar los diferentes parámetros para el control de calidad, determinando de esta forma si un producto está dentro de las

especificaciones de aceptación previamente establecidas. Tradicionalmente estas tareas de inspección y selección son realizadas por operadores humanos, sin embargo, los límites de detección de defectos muchas veces superan la percepción del ojo humano lo que hace de los sistema de visión artificial una alternativa adecuada, además de ventajosa, especialmente en tareas que tengan un carácter repetitivo y que se realicen a alta velocidad.

La incursión de la visión artificial en los sistemas de control de calidad dentro del ámbito agroindustrial, ha sido impulsada por los grandes avances en el desarrollo de las técnicas del procesamiento digital de imágenes. En este sentido, las tecnologías de visión artificial se han visto beneficiadas por los progresos en los microprocesadores, la alta resolución de las cámaras, el desarrollo de sistemas de iluminación, así como por las investigaciones realizadas por especialistas en agricultura, conjuntamente con investigadores de automática y visión. La mayoría de los sistemas se desarrollan a la medida del problema a resolver, esto significa que a menudo incorporan iluminación cuyo espectro es específico para el tipo de alimento a inspeccionar, de forma que puedan mejorar la inspección de estos tipos de productos. Estos sistemas son capaces de clasificar los alimentos con respecto a su apariencia, y por tanto, pueden identificar defectos relacionados con plagas, picaduras de animales, efecto de las heladas, oxidación o cualquier otro tipo de imperfecciones o enfermedades que pueden identificarse a través de la superficie.

## **2.2 PROTOTIPO DE VISIÓN ARTIFICIAL PROPUESTO PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE FRESAS.**

Con el objetivo de optimizar el control de calidad en fresas, teniendo en cuenta para su clasificación la Norma Técnica Colombiana NTC 4103, se

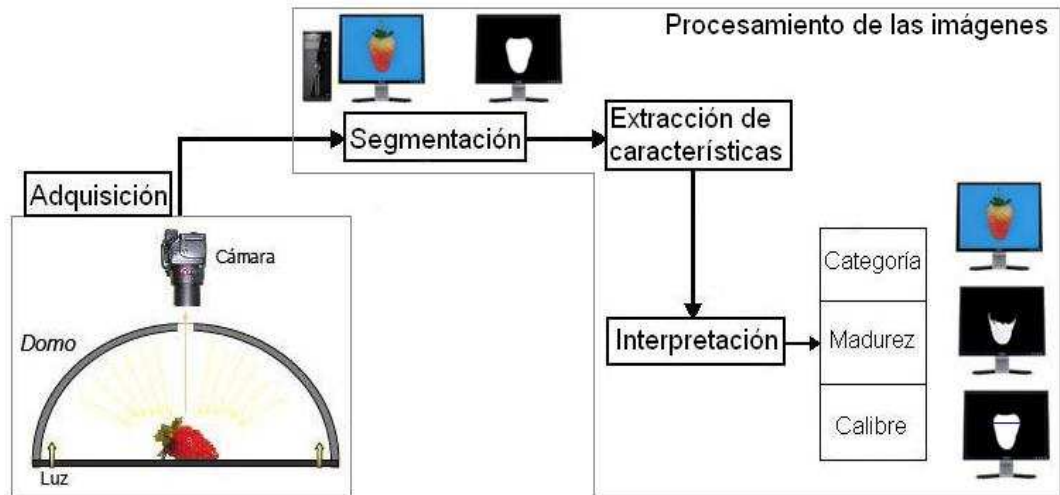
propone en este trabajo un sistema de visión artificial el cuál logra clasificar la fresa y establece lo siguiente:

- Categoría: La categoría depende de la presencia de defectos tanto superficiales como de forma presentes en la fresa.
- Estado de Maduración: El estado de maduración depende de la cantidad del área total de la fresa que se encuentra madura lo cual se identifica por el color rojo exhibido.
- Calibre: El calibre depende de la medida del diámetro máximo de la fresa el cual se encuentra en la región cercana al cáliz.

El sistema propuesto consta de dos etapas generales. La primera es la etapa de Adquisición de las imágenes, que está constituida por el sistema de iluminación y por el sistema de captura de las imágenes, los cuales ayudan a obtener imágenes adecuadas para su posterior procesamiento. La segunda etapa es la del Procesamiento de las imágenes adquiridas, la cual consta de la segmentación donde básicamente se separa la fresa del fondo, la extracción de características donde se hallan aquellas que permiten diferenciar una clase de fresa de otra y la interpretación donde se le da un significado a las características reconocidas para llegar a encasillar la fresa en las distintas clases según sus propiedades.

La Figura 13 muestra un diagrama general de las etapas que conforman el sistema de visión artificial propuesto. En los capítulos siguientes se habla con detalle de cada una de estas etapas.

Figura 13. Diagrama general del prototipo puesto.



Fuente: Autores

### 3. SISTEMA DE ILUMINACIÓN Y ADQUISICIÓN DE LAS IMÁGENES

#### 3.1 ILUMINACIÓN

La iluminación es el aspecto más decisivo de cualquier aplicación de visión artificial. Los avances en el hardware, software y las cámaras de visión disminuyeron los costos y el tiempo de desarrollo, sin embargo, aún hay un área que sigue siendo indefinida y poco equipada, la iluminación. Eligiendo la técnica adecuada de iluminación se puede lograr un aumento en la exactitud, en la fiabilidad del sistema y en su tiempo de respuesta. Asumir que es posible compensar una inadecuada iluminación por medio de un algoritmo resulta en un error muy serio y costoso.

##### 3.1.1 Tipos De Reflexión

Al diseñar la iluminación se debe procurar que todos los haces de luz reflejados por el objeto sean tomados por la lente como parte de la imagen. Al mismo tiempo, debe evitar aquellos haces que no serán parte de la imagen.

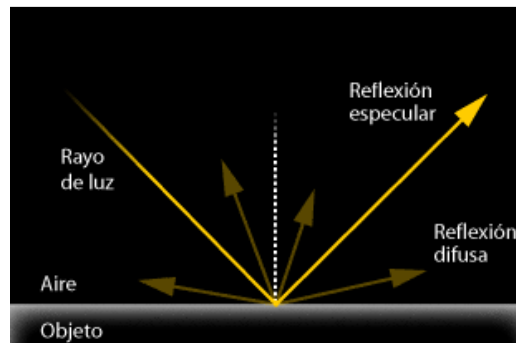
La luz es reflejada por los objetos de dos maneras llamadas reflexión especular y reflexión difusa. En la reflexión especular, cada rayo incidente se refleja en una única dirección (los rayos reflejados son paralelos). Por otro lado, en la reflexión difusa los rayos incidentes son dispersados en un rango de ángulos salientes.

- **Reflexiones Especulares:** Las reflexiones especulares son brillantes pero poco confiables. Son brillantes porque la intensidad de la reflexión es comparable con la intensidad de la luz que proviene de la fuente. En muchos

casos, las reflexiones especulares saturan al sensor de la cámara. Las reflexiones especulares no son confiables debido a que un pequeño cambio en el ángulo entre la fuente de luz, el objeto y los lentes puede causar que la reflexión especular desaparezca completamente. A menos que estos ángulos estén bien controlados, es mejor evitar la presencia de este tipo de reflexiones. El mejor método para iluminar partes que producen reflexiones especulares es la iluminación difusa [14].

- **Reflexiones Difusas:** Las reflexiones difusas son tenues pero estables. La intensidad de la reflexión puede ser de 10 a 1000 veces menor que la intensidad de la fuente de luz. La intensidad de la luz reflejada cambia lentamente con el ángulo. Las superficies difusas pueden ser iluminadas correctamente usando fuentes de luz difusas como así también fuentes de luz puntuales [14].

Figura 14. Tipos de reflexión.



Fuente: <http://www.gusgsm.com/>

### 3.1.2 Tipos De Iluminación

- **Iluminación Posterior (Backlight):** La iluminación posterior permite delinear el contorno de las piezas, minimiza la visibilidad de objetos traslúcidos y permite visualizar perforaciones pasantes. Esta técnica produce

bordes muy contrastados, para mediciones de precisión. En las imágenes tomadas bajo esta técnica, el fondo aparece uniformemente blanco y el objeto se visualiza mediante su silueta.

- **Iluminación Frontal Oblicua Y Direccional:** La dirección de la iluminación, conocida como el ángulo de incidencia, es el ángulo entre el plano normal a la superficie y el rayo incidente. Cuando los haces de luz forman un ángulo de 20 grados con la superficie, se puede maximizar el contraste en objetos con relieves de manera que los bordes aparezcan brillantes frente al fondo oscuro que forman las superficies planas del objeto. En la iluminación frontal direccional, el ángulo entre los rayos incidentes y la superficie es de  $30^\circ$ , lo que reduce un poco el contraste pero incrementa la cantidad de información obtenible de las superficies planas.

- **Iluminación Frontal Axial (Difusa):** Usada para generar iluminación superior. Con esta técnica se puede iluminar desde el mismo eje de la cámara con luz uniforme, incluyendo el centro de la imagen. Permite iluminar uniformemente superficies reflectivas. Los bordes pueden quedar difuminados y el contraste puede ser bajo en zonas monocolor.

- **Iluminación de Campo Oscuro (Dark Field):** Se trata de luz directa de alta intensidad que se hace incidir sobre el objeto con un ángulo muy pequeño respecto a la superficie donde descansa. La luz incidente se refleja lejos de la cámara y la iluminación es creada por reflexión especular. Ilumina defectos y produce una imagen de alto contraste en algunas aplicaciones pero no ilumina superficies planas.

- **Array de Luces:** La luz producida por el arreglo de luces llega directamente al objeto. Produce un gran contraste y resalta las texturas,

relieves y fisuras del objeto iluminado debido a que cualquier relieve, por pequeño que sea, produce una sombra muy definida.

- **Iluminación de Campo Claro (o Brillante):** La fuente de luz es uniforme y difusa (suave) e incide con un pequeño ángulo sobre la superficie reflectante del objeto a inspeccionar. La cámara se coloca con el mismo ángulo de forma que obtenga una imagen reflejada de la fuente de luz en la superficie del objeto inspeccionado. Una posible imperfección en el mismo producirá una mancha oscura en la imagen captada por la cámara como consecuencia de la variación del ángulo de reflexión que produce la imperfección con respecto al ángulo de la luz incidente, perdiéndose el reflejo de la fuente de iluminación.

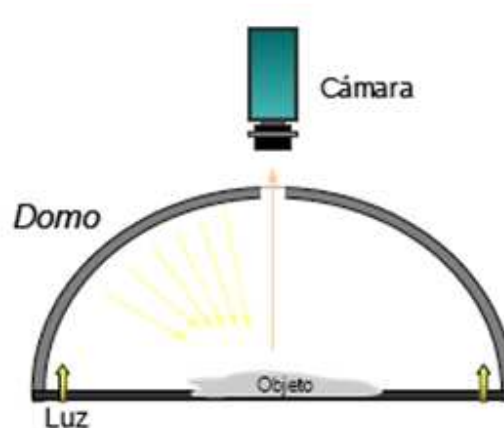
### 3.2 SISTEMA DE ILUMINACIÓN ELEGIDO

La iluminación juega un papel primordial dentro del proceso de visión, pues simplifica considerablemente el análisis y la interpretación de la escena. Las imágenes recibidas por la cámara no pueden estar, generalmente, en un ambiente de iluminación no controlada, esto es, donde las condiciones de iluminación no hayan sido estudiadas. Después de considerar las anteriores técnicas de iluminación y bajo las características de esta aplicación, específicamente, el tipo de iluminación que mejor se adapta, más ventajas brinda y por tanto seleccionado en este trabajo se describe a continuación:

- **Iluminación de Día Nublado (CDI):** La técnica Cloudy Day Illumination suministra iluminación difusa y su intención es proporcionar luz de todos o casi todos los puntos, lo que crea una perfecta iluminación libre de sombras. El resultado es similar a los efectos observados durante un día perfectamente nublado, donde la dirección del sol es totalmente

imperceptible. La luz parece venir desde todos los ángulos de igual forma, y todos los objetos están bañados de luz por igual en todas las direcciones. Ha sido diseñada para las aplicaciones más complejas y difíciles con superficies reflexivas irregulares que necesitan luz completamente uniforme convirtiéndose en el sistema más perfecto de iluminación difusa que existe. La CDI cuenta con una esfera difusora para proporcionar un ambiente de iluminación difusa. La figura 15 muestra un esquema típico de CDI.

Figura 15. Esquema típico de CDI.



Fuente: J. RODRÍGUEZ. Introducción a los sistemas de visión artificial.

La CDI ha sido diseñada para aplicaciones críticas que están basados en objetos con superficies altamente especulares donde cualquier reflexión puede confundirse con un defecto. Ejemplos de este tipo de aplicaciones incluyen: verificación e inspección de patrones.

### 3.3 FUENTES LUMINOSAS

Entre los elementos comerciales que se pueden utilizar para una correcta iluminación de un sistema de visión cabe destacar: luces incandescentes, fibra óptica, fluorescentes, leds y láseres. Factores como: intensidad

lumínica, duración, flexibilidad de diseños y precio, condicionan el tipo de iluminación.

- **Luces incandescentes:** Las luces incandescentes presentan un bajo costo, son fáciles de usar y además pueden estar funcionando durante largos periodos de tiempo. Éstas suelen ser puntos luminosos, no direccionales y con moderada eficiencia energética. El principal inconveniente es el elevado calor que desprenden, producto de su funcionamiento y que limita su aplicación [4].

- **Florescentes:** Los fluorescentes son fuentes de luz que se caracterizan por no generar calor, pero su limitada variedad de formas, limita su utilización. Para aplicaciones industriales es importante que los fluorescentes funcionen a alta frecuencia, al menos a 25kHz. En aplicaciones de visión no suelen utilizarse fluorescentes estándar debido a su efecto de parpadeo, que dependiendo de la velocidad a la que la cámara funcione, puede verse reflejado en la intensidad de la imagen capturada [14].

- **Fibra óptica:** El uso de fibra óptica, como guía de luz, está asociado a la transmisión de la iluminación pero no del calor, por lo que suele ir asociado a fuentes incandescentes. Su aplicación está principalmente en la iluminación de pequeñas áreas y concavidades, como por ejemplo en la endoscopia [4].

- **Láser:** El láser es empleado en iluminación estructurada. Es una fuente monocromática que puede presentar diferentes patrones de luz: punto, línea, rejillas. Su gran inconveniente es la necesidad de emplear sistemas de seguridad, para evitar daños en los operarios que trabajen cerca del estos sistemas de iluminación [14].

### 3.4 FUENTE DE LUZ SELECCIONADA

Cuando las fuentes luminosas emplean corriente alterna, la radiación luminosa varía de intensidad y puede provocar la variación de una imagen a otra. Por eso, a veces, se emplean fuentes luminosas que puedan ser alimentadas con corriente continua. Por la anterior y otras consideraciones como: mantenimiento, costo y facilidad de recambio, temperatura y disposición física, variación de la iluminación en largos periodos de tiempo, arranque y calibración, la fuente de luz seleccionada para el sistema de iluminación es el led.

- **LED:** Los LEDS proporcionan una intensidad de iluminación relativa a un costo muy interesante, y además tienen una larga vida. Otra consideración que se tiene en cuenta es que sólo requieren un cable de alimentación y no un haz de fibra óptica que en ocasiones es muy delicado. La intensidad de la iluminación continua por LED no es tan intensa como otros tipos de iluminación pero actualmente existen en el mercado leds de alta intensidad que proporcionan una iluminación mucho más potente, además, permiten concentrar un gran número en una superficie muy reducida y por tanto aumentar aún más el poder lumínico.

### 3.5 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DEL SISTEMA

Una vez definido el sistema de iluminación, la atención se centra en el proceso de captura y digitalización de la escena. Este apartado trata los aspectos más relevantes del proceso de captura y digitalización de la imagen, esto es, la adquisición de la imagen del mundo físico y su paso al dominio discreto. Una vez digitalizada la imagen bidimensional esta queda constituida por un conjunto de elementos llamados pixeles. Cada píxel ofrece

cierta información sobre una región elemental de la imagen. En imágenes en niveles de gris esta información es el brillo. En imágenes en color, la información corresponde a la intensidad de cada una de las componentes de una base de color (por ejemplo RGB).

En el proceso de obtención de imágenes digitales se distinguen dos etapas. La primera, conocida como captura, utiliza un dispositivo óptico, con el que obtiene información relativa a la escena. En la segunda etapa, que se conoce como digitalización, se transforma esa información, que es una señal con componentes continuas, en la imagen digital, que es una señal con todas sus componentes discretas.

### **3.5.1 Modelo De Captura De Imágenes**

A grandes rasgos, para capturar una imagen se suele distinguir entre dispositivos pasivos (basados generalmente en el principio de cámara oscura) y dispositivos activos (basados en el escaneo). Esta clasificación no incluye todas las formas posibles de creación de imágenes.

**3.5.1.1 El Modelo De Lente Fina (cámara oscura).** Desde hace mucho tiempo es conocida la manera de formar una imagen utilizando el principio de cámara oscura. Este dispositivo pasivo está constituido por una caja cerrada, conocida como cámara, en una de cuyas paredes existe un orificio que permite el paso de la luz. La luz, tras entrar en la cámara, se proyecta sobre la pared opuesta a la que tiene el orificio, obteniéndose allí una imagen invertida de la escena que está fuera de la cámara. Cardan, en 1550, tuvo la idea de colocar una lente delante de dicho orificio para aumentar la luminosidad. Para explicar el funcionamiento del conjunto se usa el modelo de lente fina. El modelo de lente fina explica que una lente de grosor despreciable y perfectamente biconvexa permite recoger la luz de una

escena y proyectarla de manera nítida sobre una superficie llamada plano de formación de la imagen [16].

El principio de cámara oscura, descrito anteriormente, se puede usar para capturar imágenes de escenas tridimensionales (del mundo real) y proyectarlas en un plano bidimensional. Dispositivos de este tipo son las cámaras fotográficas. También se pueden usar dos o más cámaras para capturar diferentes perspectivas de una misma escena y construir una representación 3D de la misma.

### 3.5.2 La Digitalización

Es el proceso de paso del mundo continuo (o analógico) al mundo discreto (o digital). En la digitalización normalmente se distinguen dos procesos: el muestreo y la cuantización.

**3.5.2.1 Muestreo.** El muestreo de una señal continua consiste en la medición a intervalos (discretización) respecto de alguna variable (generalmente el tiempo o el espacio), siendo su parámetro fundamental la frecuencia de muestreo, que representa el número de veces que se mide un valor analógico por unidad de cambio.

Mediante el muestreo se convierte una imagen  $I_c$ , que es algo continuo, en una matriz discreta  $I_D$  de  $N \times M$  píxeles. El número de muestras por unidad de espacio sobre el objeto original conduce al concepto de resolución espacial de la imagen.

De esta forma, el proceso de muestreo, para una imagen, que asocia a cada punto un valor real, cambia una imagen del formato:

$$I_c(x, y) \in \mathbb{R} \text{ en donde } x, y \in \mathbb{R}$$

al formato:

$$I_D(x, y) \in \mathbb{R} \text{ en donde } x, y \in \mathbb{N} \text{ y } 0 \leq x \leq N - 1, 0 \leq y \leq M - 1$$

que se puede representar en forma matricial:

$$I_D(x, y) = \begin{pmatrix} I_D(0,0) & I_D(0,1) & \dots & I_D(0, M-1) \\ I_D(0,1) & I_D(1,1) & \dots & I_D(1, M-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_D(N-1,0) & I_D(N-1,1) & \dots & I_D(N-1, M-1) \end{pmatrix}$$

**3.5.2.2 Cuantización.** La segunda operación es la cuantización de la señal, que consiste en la discretización de los posibles valores de cada píxel. Los niveles de cuantización suelen ser potencias de 2 para facilitar el almacenamiento en el computador de las imágenes, ya que éstos utilizan el byte como unidad mínima de memoria directamente direccionable. Así, suelen usarse 2, 4, 16 ó 256 niveles posibles. De esta forma,  $I_D$  que pertenece a  $\mathbb{R}$  se convierte en  $I_{DC}$  (discreta cuantizada) que pertenece a  $\mathbb{N}$ . El número de niveles posibles define la resolución radiométrica.

$$I_{DC}(x, y) \in \mathbb{N}$$

Donde,

$$\begin{aligned} x, y \in \mathbb{N} \text{ y } 0 \leq x \leq N - 1, 0 \leq y \leq M - 1 \\ 0 \leq I_{DC}(x, y) \leq 2^q - 1 \end{aligned}$$

Cuando las imágenes sólo tienen información sobre el brillo se habla de imágenes en niveles de gris y se suelen utilizar hasta 256 niveles para representar los tonos intermedios desde el negro (0) hasta el blanco (255). Si sólo se permiten dos niveles de cuantización (normalmente blanco y negro) se habla de imágenes binarias. Para el caso del color suelen usarse 256 niveles para representar la intensidad de cada uno de los tres colores

primarios (RGB). De esta forma se obtienen 16 millones de colores aproximadamente ( $256 \times 256 \times 256$ ) y se habla de imágenes en color real.

### **3.6 CÁMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL**

Básicamente, una cámara fotográfica está constituida por un recinto oscuro (la cámara), en la que se ha montado un objetivo. El objetivo está formado por un conjunto de lentes que tiene la misión de comportarse como una única lente que seguiría el modelo ideal de lente fina, intentando corregir las aberraciones que se producen al utilizar lentes reales.

El objetivo forma la imagen luminosa en el interior de la cámara, en el plano de formación de la imagen, donde hay una superficie sensible a la luz. En una cámara de fotografía digital el dispositivo sensible es un componente electrónico constituido por una matriz de elementos fotosensibles, que se sitúa en el mismo lugar que el plano de formación de la imagen, de manera que se forma la imagen sobre él. El funcionamiento de estos elementos fotosensibles tiene su base en el efecto fotoeléctrico. Consisten en materiales que de forma espontánea emiten electrones en una cantidad proporcional al número de fotones que reciben. El número de elementos fotosensibles, junto con el área que ocupan, definen la resolución espacial del dispositivo. Por otro lado, cada uno de estos elementos fotosensibles es capaz de obtener una carga eléctrica proporcional a la intensidad de la luz que le incide. Después, la carga eléctrica de cada elemento se transmite a un amplificador eléctrico. El tiempo que tarda esta operación determina el número de imágenes por segundo que puede tomar el dispositivo. Finalmente, esta información de carga analógica es discretizada mediante un conversor analógico digital. Actualmente existen dos tecnologías para estos dispositivos: CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) y CCD

(*charge coupled devices*). La tecnología CMOS es más económica al basarse en elementos semiconductores clásicos. Sin embargo la resolución y la respuesta conseguida con la tecnología CCD ha sido hasta ahora mejor.

Entre el objetivo y la superficie sensible se encuentra el obturador, que sólo deja pasar la luz en el momento de captura de la imagen. Este momento lo determina el fotógrafo presionando el disparador. Para permitir al usuario encuadrar el objeto el aparato dispone de un visor. Una cámara también suele permitir variar la cantidad de luz que entra en ella mediante un dispositivo conocido como diafragma. Por último hay que decir que este esquema básico se complica en la realidad con multitud de detalles técnicos que diferencian unas cámaras de otras.

### 3.7 CANON POWERSHOT A430

Figura 16. Cámara digital del sistema.



Fuente: <http://www.techtop.it/>

Trata de un modelo de fácil manejo en comparación con algunas otras cámaras fotográficas que cuentan con funciones adicionales. La cámara Canon PowerShot A430 ofrece una buena combinación de características y una buena calidad de imagen, a un precio muy asequible. Esta cámara incorpora velocidades de procesamiento rápidas, controles eficientes y una calidad de imagen superior. Los botones de control principales pueden encontrarse en la parte trasera de la cámara y se pueda acceder a ellos con los dedos sin ninguna complicación permitiendo seleccionar el modo de disparo, además de otros controles como zoom, flash, macro y el acceso al menú donde se encuentra la configuración para el control de elementos tales como la sensibilidad de la cámara a la luz y el balance de blancos [15]. En la Tabla 5 se encuentran algunas especificaciones técnicas de ésta cámara.

Tabla 5. Especificaciones técnicas PowerShot A430.

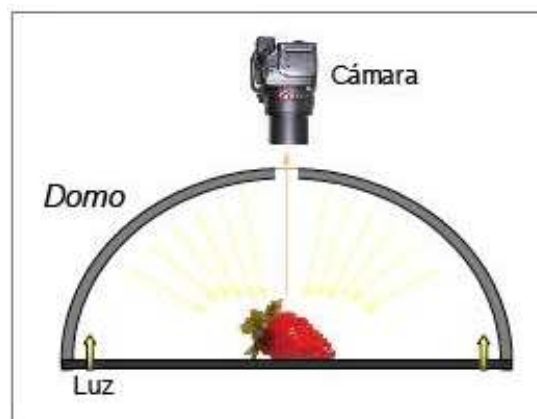
Píxeles efectivos	4 millones aprox.
Sensor de imagen	1/3" CCD
Lente	5.4 (G) <sup>1</sup> – 21 (T) <sup>2</sup> mm <sup>1</sup> Gran angular <sup>2</sup> Teleobjetivo
Numero píxeles de grabación (imágenes fijas)	Grande: 2272X1704 píxeles Media 1: 1600X1200 píxeles Media 2: 1024X768 píxeles Pequeña: 640X480 píxeles
Distancia de disparo (desde el extremo del objetivo)	Normal: 47cm – infinito Macro: 5 – 47cm (G) 25 – 47cm (T) Súper Macro: 1 – 5 cm (G) Infinito: 3m – infinito
Sensibilidad a la Luz	ISO 100, ISO 400, ISO 200, ISO 64, ISO automática
Velocidad máxima obturador	1/2000 segundos
Velocidad mínima disparador	1 segundo
Formato de imágenes fijas	JPEG
Batería	AA

Fuente: Guía de usuario avanzada. Canon PowerShot A430.

### 3.8 PROTOTIPO DE ILUMINACIÓN IMPLEMENTADO

El prototipo de iluminación implementado para este proyecto se basa en la combinación del tipo de iluminación de Día Nublado con leds como fuentes de luz. Este diseño busca brindar la mejor imagen posible y así reducir el número de variables del sistema de visión.

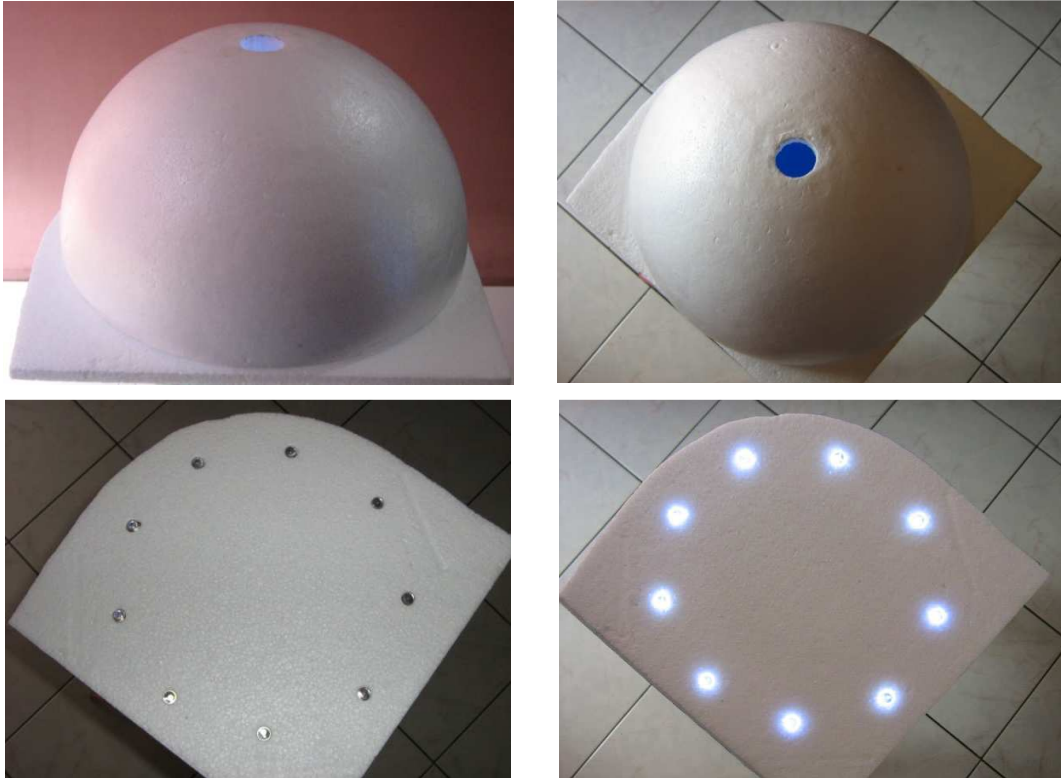
Figura 17. Prototipo de adquisición de imágenes del sistema.



Fuente: Autores.

Para ello se emplea una superficie reflectante de forma semiesférica llamada domo, hecha completamente de icopor, que actúa como fuente de iluminación al reflejar la luz de los leds. Estos se encuentran ubicados alrededor de una placa también de icopor de manera equidistante, logrando proporcionar una iluminación más potente (Figura 18). En este sentido, se logra eliminar las sombras y reflejos, y se gana algo de contraste, suavizando las texturas y minimizando la influencia de las rayas y los relieves, así como de las curvaturas que pueda tener la fresa inspeccionada al ser iluminada desde todas direcciones con luz difusa.

Figura 18. Prototipo de adquisición construido.



Fuente: Autores.

El espacio captado por la cámara está aislado de todo. No hay contaminación lumínica, no hay sombras inesperadas y no existen objetos que interfieran con la escena que se desea capturar.

### **3.9 CONFIGURACIÓN DE LA CÁMARA POWERSHOT A430 Y TOMA DE IMÁGENES**

En primera instancia se analiza el fondo de la escena buscando el color que más y mejores ventajas brinda en conjunto con la fresa. Se opta por un color

azul para el fondo ya que no está presente en una fresa y permite una sencilla detección y por consiguiente segmentación de la misma.

Las primeras imágenes se toman ajustando la cámara en modo completamente automático, permitiéndole realizar por sí sola, los respectivos ajustes de acuerdo a la escena. Resultado de ello, imágenes de baja calidad, pobres en contraste y en detalles.

Figura 19. Imagen en modo automático.



Fuente: Autores.

Los resultados anteriores no son satisfactorios para el propósito de este trabajo. Las imágenes finales deben ser de excelente calidad, resaltar los detalles de la fresa y representar fielmente la escena real.

Un ajuste manual donde se tenga control de los parámetros especiales para lograr la mejor captura es lo adecuado. Para este fin y luego de estudiar detenidamente la guía avanzada de usuario de la cámara PowerShot A430 se configuran principalmente los siguientes parámetros:

- **Píxeles de grabación y compresión:** Se Ajusta los píxeles de grabación (imágenes fijas) y se establecen en 640X480 píxeles y un nivel de compresión súper fina.

Figura 20. Selección de píxeles y nivel de compresión.



Fuente: Guía de usuario avanzada. Canon PowerShot A430.


- **Macro** : En este caso la fotografía es tomada a una distancia pequeña (15cm), de manera que ajustar la cámara en este modo se hace preciso para capturar más claramente los detalles de la fresa al permitir tomar primeros planos de objetos pequeños. A continuación se presenta dos imágenes que explican mejor esta configuración.

Figura 21. (a) Imagen en modo Normal, (b) imagen en modo Macro.



Fuente: Autores.

- **Ajuste del tono (Balance de blancos)**

Figura 22. Selección de balance de blancos.



Fuente: Guía de usuario avanzada. Canon PowerShot A430.

Normalmente, el ajuste de blancos como AWB (Auto) selecciona un balance de blancos óptimo, pero en este caso, no es capaz de producir colores naturales. Por esto, se realiza un ajuste personalizado de acuerdo a la fuente de luz con la que se cuenta a fin de obtener un ajuste mas ideal para las condiciones de disparo; para ello, junto con un nivel de compensación de la exposición en ( $\pm 0$ ), se evalúa un ambiente ausente de fresas con un fondo completamente blanco, asegurándose que la imagen blanca ocupa todo el recuadro central de la pantalla LCD. A continuación se observa el efecto de este ajuste.

Figura 23. (a) Imagen AWB auto, (b) imagen personalizada.



(a)



(b)

Fuente: Autores.

- **Modo Mis colores**

Figura 24. Selección modo Mis colores.

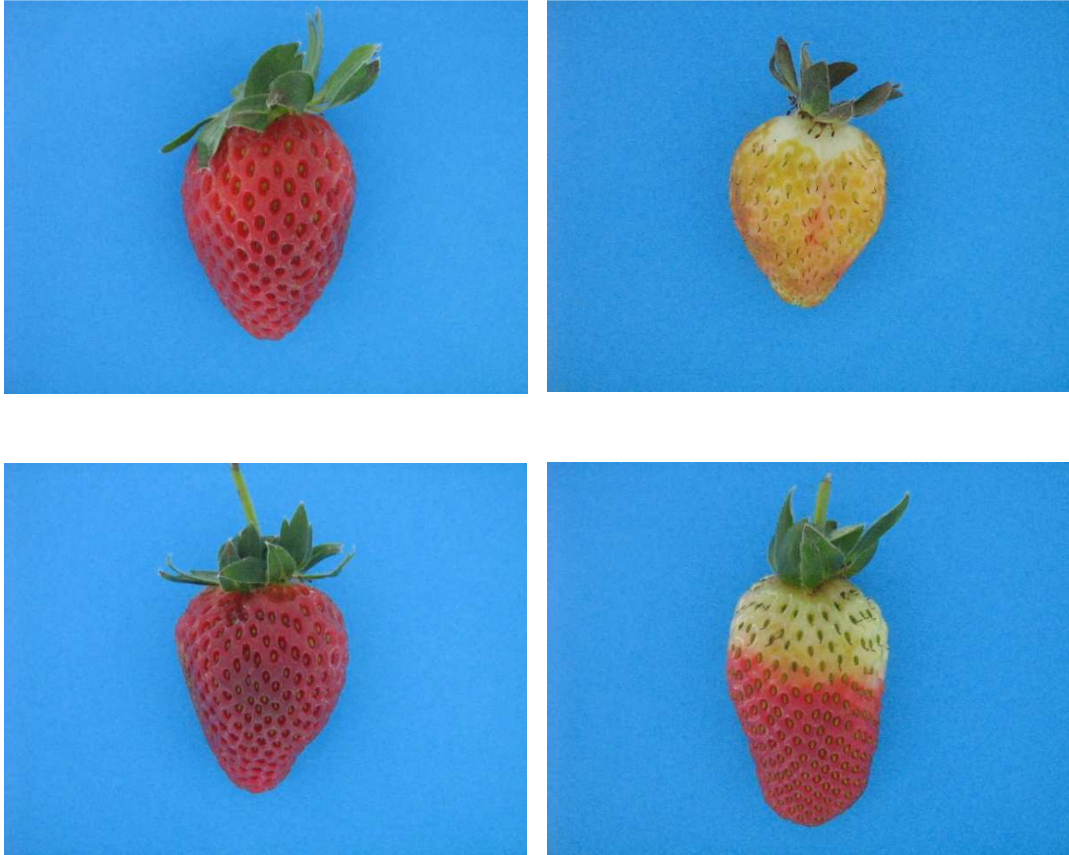


Fuente: Guía de usuario avanzada. Canon PowerShot A430.

La intención es acentuar el color rojo de la fresa lo suficiente sin llegar a exagerarlo, al mismo tiempo, atenuar el color azul presente en el fondo. Se elige “Color personal” el cual permite realizar ligeros ajustes y con ello personalizar el contraste, la nitidez y la saturación así como el balance de rojo, verde y azul. Finalmente, buscando acentuar las características de interés y se minimizando aquellas intrascendentes de la escena, se ajusta el nivel de rojo (+1), el nivel de azul (-1) y la saturación (+1) lo cual resulta muy apropiado dándole más énfasis y fuerza a la fresa.

Luego de las configuraciones correspondientes, la etapa de adquisición obtiene las imágenes finales en las que se resaltan zonas de interés y acentúan características específicas que se desean extraer, para así, facilitar su análisis en posteriores etapas. A continuación se presentan una variedad de ellas.

Figura 25. Imágenes finalmente adquiridas.



Fuente: Autores.

La mejor imagen es aquella que facilita la tarea de inspección, muchas veces, los algoritmos de procesamiento pueden ser reducidos drásticamente con una selección adecuada del sistema de formación de las imágenes. Por el contrario, la falta de estudio sobre la adquisición de las imágenes provocará el aumento de la complejidad de los algoritmos y las dificultades de generalización del sistema. En este mismo sentido, la etapa de adquisición entrega las mejores imágenes posibles, logrando liberar al sistema de los algoritmos de pre-procesamiento, cuya función son adecuar la

captura, corrigiendo problemas causados por una mala iluminación, bajo contraste, ruido y destacar detalles.

## 4. PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES ADQUIRIDAS

### 4.1 SEGMENTACIÓN

En el análisis de imágenes, el primer paso generalmente consiste en separar o segmentar la imagen en regiones, como se define en Molina [2] *“Una región, en una imagen, es un grupo de píxeles conectados que tienen propiedades similares”*. Para que sea posible interpretar una imagen es fundamental separar correctamente las regiones de interés del resto de la imagen, es por esto que esta etapa es primordial para el desarrollo del sistema pues es a partir de la imagen segmentada que se realizan los análisis posteriores.

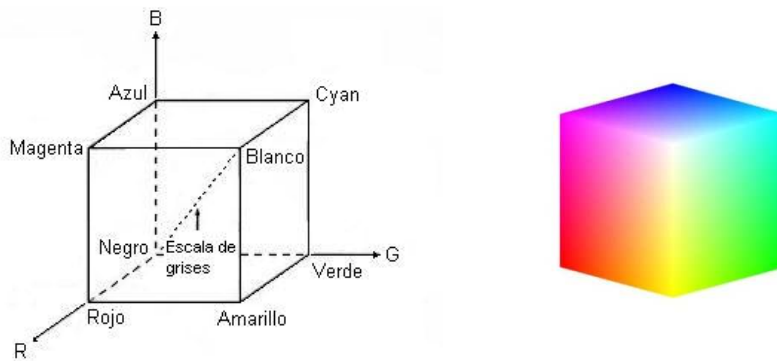
En este caso, el trabajo se concentra en segmentar el área que corresponde a la fresa del resto de la imagen que pertenece al fondo. Para lograr este propósito se hace necesario caracterizar adecuadamente los colores pertenecientes al fruto tanto inmaduro (verde) como maduro (rojo). Una vez caracterizado el color de la fresa se aplica una técnica básica de segmentación como es la Umbralización para separar la zona de interés del resto de la imagen.

La caracterización de los colores de interés es posible si la imagen es tratada en un modelo de color apropiado, el cual permita la manipulación de los colores, diferenciado correctamente un color de otro. A continuación se presentan los modelos de color que se han usado en esta etapa del sistema:

- **Modelo RGB.** En este modelo, cada color aparece en sus componentes espectrales primarias: rojo, verde y azul [13]. El modelo RGB

se basa en el sistema de coordenadas cartesianas. El subespacio de color de interés en este caso es el cubo mostrado en la Figura 26.

Figura 26. Cubo RGB.



Fuente: R.C. González, Digital Image Processing.

Las imágenes aquí se forman por tres planos de imágenes independientes donde cada uno corresponde a los colores primarios. Para producir una imagen de color compuesta, los tres planos se combinan en los fotosensores de los monitores o de las cámaras de vídeo y fotografía entre otros.

El modelo RGB es muy útil para implementaciones de hardware, de aquí que la gran mayoría de las cámaras de color que se utilizan para capturar imágenes digitales emplean este modelo de color, es por esto que las imágenes adquiridas en este proyecto se encuentran inicialmente en este formato. Sin embargo este modelo no siempre es el más adecuado para el procesamiento de imágenes, existen otros modelos más convenientes para el análisis de color dado que son más cercanos a la forma de percepción humana.

- **Modelo HSI.** Este modelo se asemeja más a la forma en que el hombre percibe los colores. Cuando un hombre ve un objeto de color trata de describirlo según su matiz, saturación y brillo. El matiz (hue) es un atributo

del color que describe su pureza con lo que se puede distinguir, por ejemplo, el amarillo del rojo. La saturación (saturation) muestra la cantidad de color presente y la medida en que el color puro es diluido con la luz blanca, así se puede diferenciar, por ejemplo, el rojo del rosado. El brillo es un descriptor subjetivo y muy difícil de medir, representa la noción acromática de intensidad (intensity) y es un factor clave en la descripción de la sensación de color, gracias a él es posible distinguir entre un rojo oscuro y un rojo claro.

Este modelo resulta ventajoso para el desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes basados en alguna de las sensaciones de color del sistema visual humano debido a que logra separar la componente de intensidad I, de la información de color de la imagen contenida en las componentes de matiz y saturación, y estas últimas están estrechamente relacionadas con la forma en que los humanos perciben el color.

Es por estas ventajas que en este trabajo se escoge el sistema HSI para separar la región de interés (la fresa) del resto de la imagen.

- **Conversión de RGB a HSI.** Las componentes de color del modelo HSI se pueden definir con el modelo circular mostrado en la Figura 27 en donde el eje representa la progresión de la escala de grises desde el negro hasta el blanco, la distancia desde el eje central es la saturación y el ángulo con respecto al eje rojo es el matiz.

Teniendo una imagen en formato RGB es posible hacer su conversión al modelo HSI usando las siguientes ecuaciones [1]:

La componente de matiz viene dada por:

$$H = \begin{cases} \theta & \text{si } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{si } B > G \end{cases}$$

Donde

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{\frac{1}{2}}} \right\}$$

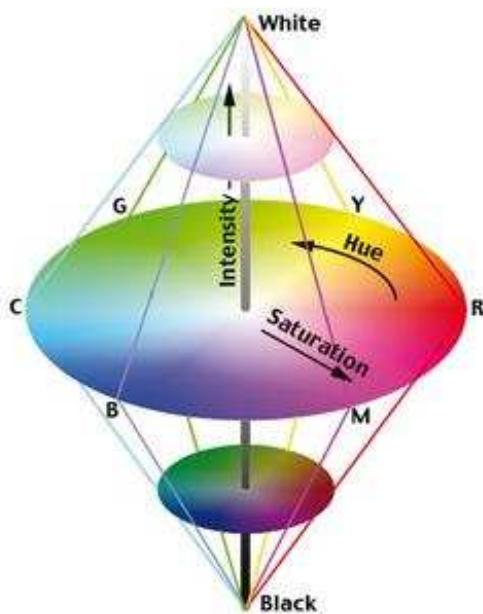
La componente de saturación es dada por

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} [\min(R, G, B)]$$

Finalmente, la componente de intensidad está dada por

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B)$$

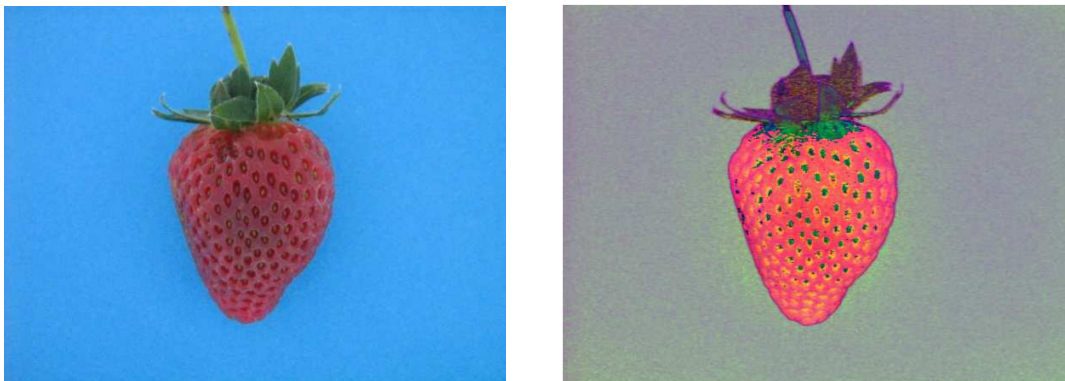
Figura 27. Representación bicónica del modelo HSI.



Fuente: J. C. Russ, The Image Processing Handbook.

La Figura 28 muestra la imagen original en formato RGB y la imagen luego de la transformación al modelo HSI.

Figura 28. (a) Imagen en RGB, (b) Imagen en HSI



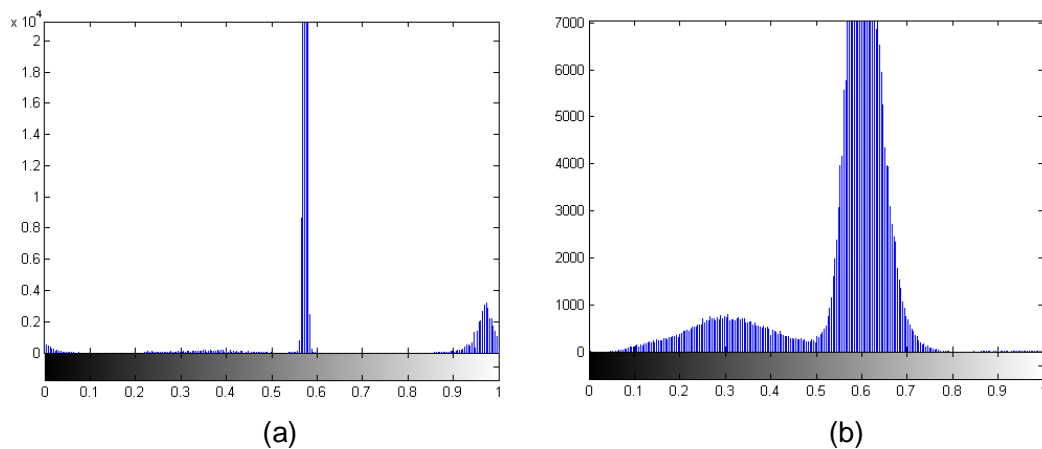
(a)

(b)

Fuente: Autores.

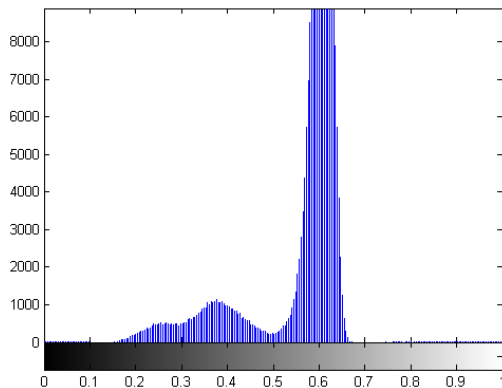
Luego de la transformación al modelo HSI, se observan los histogramas de cada una de las tres componentes (h, s, i) para seleccionar el canal en el cual se realizará la Umbralización. En la Figura 29 se presentan los histogramas de cada canal para la imagen mostrada en la Figura 28(b).

Figura 29. (a) Histograma del canal S, (b) Histograma del canal S, (c) Histograma del canal I.



(a)

(b)



(c)

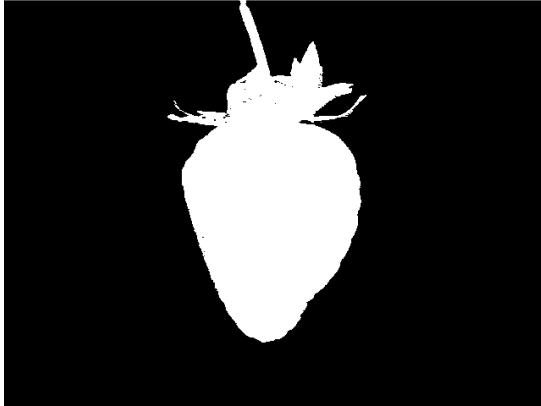
Fuente: Autores.

Tal y como era de esperarse de acuerdo a lo planteado sobre cada uno de los canales que componen el modelo HSI, se puede apreciar que el canal H es el que presenta distintas zonas claramente separadas en su histograma lo cual es justamente lo que se busca para facilitar la segmentación por Umbralización, así que este es el canal que se elige para esta etapa de segmentación de la fresa.

- **Umbralización.** Observando un histograma de niveles de grises, una forma típica de segmentar los objetos del fondo es seleccionar un umbral  $T$ , que bien puede ser un valor entero o un intervalo del histograma, donde los pixeles dentro de este rango pertenecen a la región de interés y se asigna el valor de 1 (o 0 si se prefiere) y el resto de pixeles de la imagen se toman como el fondo y se le asigna el valor de 0 (o 1 si se prefiere). De esta forma se logran separar las dos regiones.

Observando los histogramas del canal H para distintas imágenes de fresas se logra establecer que el fondo de la imagen (la región azul) se encuentra entre los valores de 0.5 y 0.71. Segmentando con este umbral, para la imagen presentada en la Figura 28 se obtiene lo mostrado en la Figura 30.

Figura 30. Fresa segmentada del fondo.

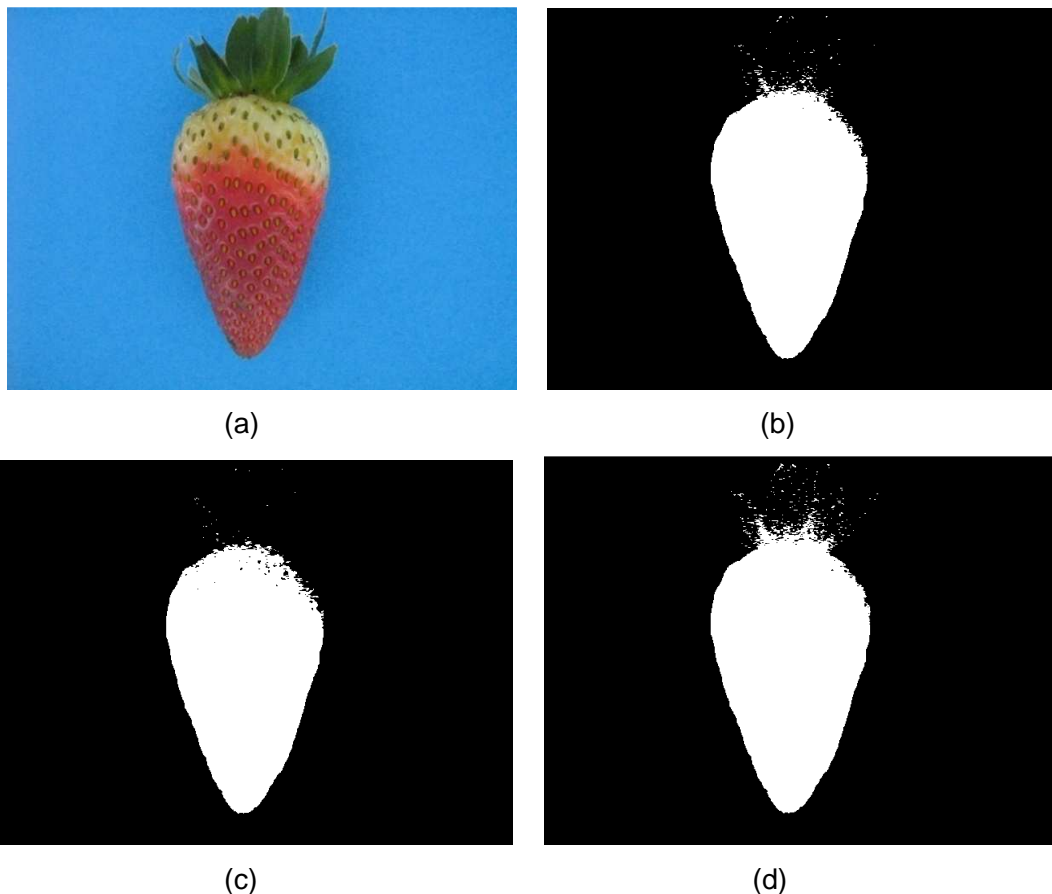


Fuente: Autores.

No obstante, esta segmentación no es suficiente pues la región que realmente interesa en este caso es la que corresponde a la fresa sin cáliz (hojas) ni pedúnculo (tallo). Experimentalmente se llega a determinar que la región correspondiente al cáliz y pedúnculo toma los valores del histograma aproximadamente desde 0.2 hasta valores cercanos a 0.5. Con el umbral superior no se presenta ningún inconveniente pues la región que sigue después de 0.5, en el histograma, es la que pertenece al fondo azul de la imagen así que es posible formar un solo intervalo desde valores cercanos a 0.2 hasta 0.71 para eliminar las zonas correspondientes tanto a cáliz y pedúnculo como al fondo. Sin embargo, el límite inferior de este intervalo se debe seleccionar cuidadosamente pues, en el caso de frutos inmaduros que presentan una coloración verdosa, esta parte del fruto puede tomar valores iguales a los que se presentan en el cáliz de la fresa, de esta forma, si se quisiera eliminar la totalidad de la región correspondiente al cáliz y pedúnculo se tendría que sacrificar gran parte de la región del fruto inmaduro lo cual es totalmente indeseable para propósitos de este trabajo pues tanto el área de color rojo de la fresa como el área de color verde son esenciales para la determinación del estado de madurez del fruto. Luego de observar

detenidamente lo que ocurre al segmentar distintas fresas que presentan una coloración verdosa, se fija un umbral igual a 0.229 dado que con este valor se logra eliminar lo máximo posible la región perteneciente al cáliz sin llegar a perder información valiosa de área de la fresa. En la Figura 31 se muestran los resultados obtenidos al segmentar con distintos valores para el umbral inferior del intervalo. Los pixeles dentro del intervalo indicado toman el valor de 0 y los que no caen en él toman valor de 1.

Figura 31. (a) Imagen original, (b) Segmentación con intervalo de umbralización  $0.229 \leq T \leq 0.71$ , (c) Segmentación con intervalo de umbralización  $0.2 \leq T \leq 0.71$ , (d) Segmentación con intervalo de umbralización  $0.25 \leq T \leq 0.71$ .



Fuente: Autores.

Una vez hecho esto, es preciso continuar con la eliminación de los pixeles aislados que aún quedan y corresponde al cáliz y pedúnculo de la fresa. Para este fin se hace uso de operadores de morfología matemática, en este caso se aplica una apertura de la imagen.

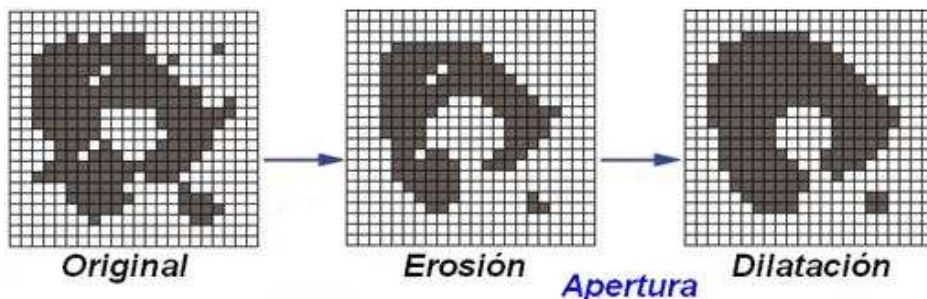
La apertura de una imagen A por un elemento estructural K se expresa  $A \circ B$  y consiste en la erosión de A por K seguida de la dilatación del resultado por K. Matemáticamente se define como:

$$A \circ K = (A \ominus K) \oplus K$$

La Erosión reduce o adelgaza objetos en una imagen, con este operador se pueden eliminar pixeles aislados que estén por fuera de la región de interés pero también reduce el tamaño de la imagen deseada. La dilatación ensancha regiones con lo que se puede rellenar pequeños huecos y a la vez se incrementa el tamaño de los objetos.

La Figura 32 muestra como al aplicar Apertura a una imagen se eliminan pixeles aislados y se separan regiones que están conectadas por uniones delgadas, esto gracias a la erosión y luego, con la dilatación se trata de regresar a la dimensión de la imagen original.

Figura 32. Aplicación de apertura a una imagen.



Fuente: J. C. Russ, The Image Processing Handbook.

Gracias a la apertura se logra eliminar algunos de los pixeles correspondiente al cáliz y el pedúnculo que siguen presentes como se muestra en la Figura 33.

Figura 33. (a) Imagen segmentada del fondo, (b) Imagen después de la aplicación de apertura.



(a)

(b)

Fuente: Autores.

Sin embargo, en muchos casos, aún después de la apertura de la imagen, siguen presentándose pequeñas áreas que no pertenecen a la región de interés, esto debido a que los pixeles del cáliz que quedan después de la segmentación no siempre están tan aislados unos de otros y pueden llegar a formar pequeñas regiones que no son suficientemente chicas para ser eliminadas con la apertura.

Para remover estos puntos totalmente se procede a eliminar regiones menores a un determinado número de pixeles que siempre será muy inferior al número de pixeles que conforman el área de la fresa que interesa. Esto se ilustra mejor en la Figura 34.

Figura 34. (a)Imagen resultante después de la apertura, (b) Imagen obtenida después de reducir áreas inferiores a 1000 píxeles.



Fuente: Autores.

De esta forma se ha logrado segmentar satisfactoriamente el área de interés del resto de la imagen. En la Figura 35 se puede apreciar la imagen segmentada en el modelo HSI y su equivalente en el modelo RGB así como la imagen de entrada original.

Figura 35. (a)Imagen de entrada original en RGB. (b) Imagen segmentada en el modelo HSI. (c)Imagen equivalente de (b) en el modelo RGB





(c)

Fuente: Autores.

## 4.2 EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS E INTERPRETACIÓN

### 4.2.1 Detección de defectos superficiales.

La calidad de la fresa se ve directamente influenciada por los diferentes defectos que pueda presentar el fruto. Algunos de estos defectos son apreciables por la forma del ápice de la fresa como se verá más adelante, mientras que otros se aprecian como manchas de distintos colores en la superficie del fruto. Estos últimos son los que se tratan en esta etapa.

Dependiendo del tipo de defecto que se exhiba en la fresa, ésta puede ser desechada por no ser apta para el consumo fresco o bien puede ser clasificada dentro de las tres categorías contempladas en la Norma Técnica Colombiana NTC 4103, las cuales son categoría extra, categoría I y categoría II como se explica en la sección 1.1.2. Los diferentes defectos presentes en la piel de la fresa pueden diferenciarse unos de otros según su color. Principalmente se pueden apreciar dos grupos de defectos, unos de color claro y otros de color oscuro.

**4.2.1.1 Detección de defectos claros.** El primer tipo de defecto se muestra como una mancha de color blanco que es ocasionada por hongo tipo moho. Al tratarse de un hongo, este defecto se clasifica como una enfermedad y es un indicador de que la fruta no es apta para el consumo fresco. La Figura 36 muestra algunas fresas que presentan este tipo de defecto.

Figura 36. Defecto blanco en las fresas.



Fuente: <http://postharvest.ucdavis.edu>

Para identificar este desperfecto se hace un análisis de los tres canales, H, S, I, de la imagen obtenida después de la segmentación y se puede establecer que el canal más conveniente para identificar este defecto es el canal S pues es donde el defecto se diferencia más claramente del resto de la fresa.

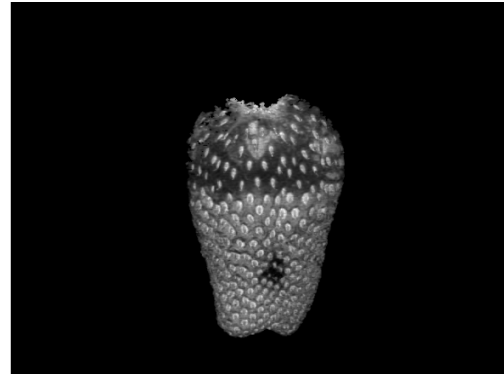
Como se ha mencionado anteriormente, el canal S muestra la saturación de la imagen y esto indica la forma en que el color es diluido con la luz blanca, de esta manera los colores con mayor contenido de blanco (como ocurre con el color característico de este hongo) se ubican en los valores más bajos del histograma y a medida que el color se va haciendo más puro (menos diluido con la luz blanca) va tomando valores mayores en el histograma. Estudiando lo que ocurre en diversas fresas que presentan este tipo de defecto se llega a establecer un intervalo del histograma del canal S, desde 0.01 hasta 0.124 dentro del cual cae este daño. De esta forma es posible detectar el hongo y

así clasificar las fresas que lo presentan como no aptas para el consumo fresco. La Figura 37 muestra un ejemplo de la detección de este defecto.

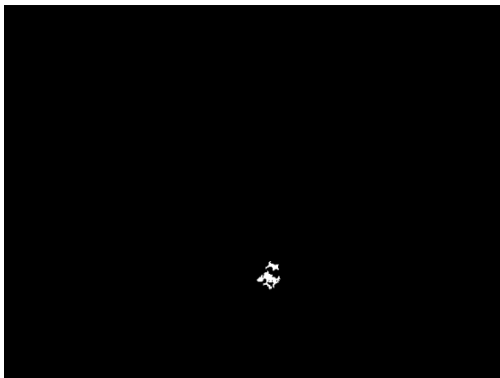
Figura 37. (a) Imagen de entrada, (b) Canal S de la imagen segmentada, (c) Defecto blanco detectado.



(a)



(b)



(c)

Fuente: Autores.

**4.2.1.2 Detección de defectos oscuros.** El segundo tipo de defectos se caracteriza por su color rojo oscuro y marrón y cubre diversos daños como pueden ser los causados por magulladuras, maduración excesiva del fruto, cicatrices de picaduras de insectos y defectos causados por deficiencia de Boro. Siempre que la suma de estos defectos no ocupe más del 20% la fruta puede ser aceptada como categoría II, si el área total ocupada por ellos es

mayor al 20% la fruta será clasificada como no apta para el consumo en fresco. La Figura 38 ilustra como luce una fresa con deficiencia de Boro.

Figura 38. Fresas con deficiencia de Boro.



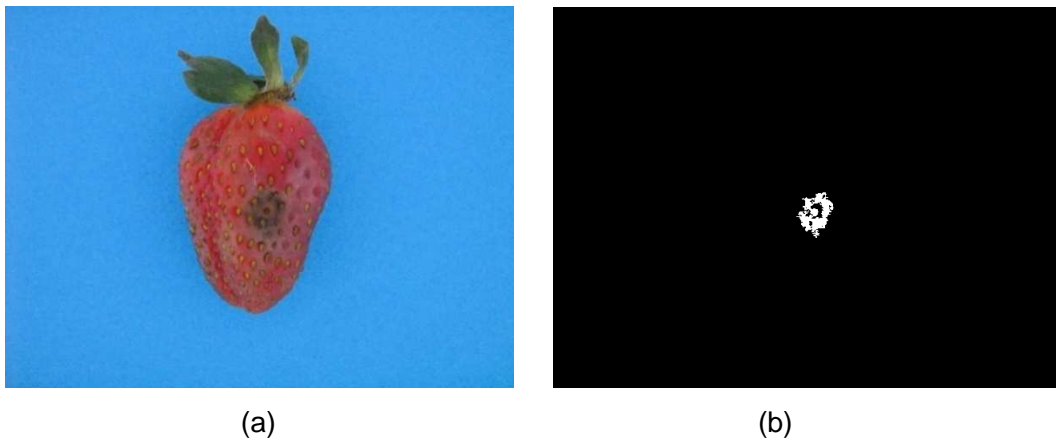
Fuente: <http://articulos.infojardin.com>

Para la detección de estos defectos se observa que el modelo de color HSI no es el más adecuado pues en ninguno de sus canales es posible una correcta segmentación del defecto del resto de la fruta sana. Es por esto que se opta por observar los distintos canales del modelo RGB dado que es el formato en que se encuentra la imagen adquirida y de ser posible la detección del defecto en este formato se evita el gasto computacional que implica la conversión a otro modelo de color.

Al analizar las distintas componentes del modelo RGB se observa que la componente R es la más conveniente para la detección de este tipo de defectos pues, contrario a lo que se observa en las componentes de modelo HSI, aquí el color del defecto no se confunde con el color rojo del fruto sano. Experimentalmente se puede hallar un intervalo entre 0.01 y 0.4 en el histograma del canal R en el cual se ubica el defecto bajo estudio.

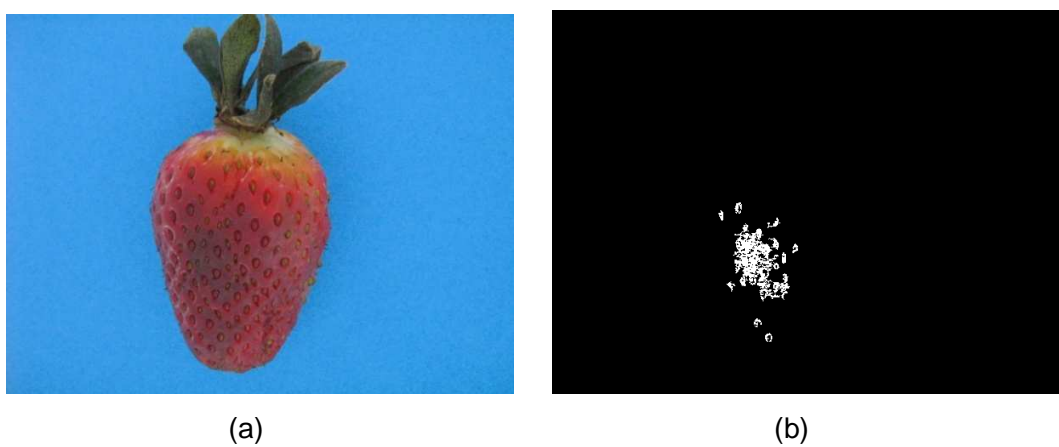
En las figuras siguientes se observan diferentes fresas en las que se detectan estos defectos.

Figura 39. (a) Fresa con defecto oscuro, (b) Defecto detectado.



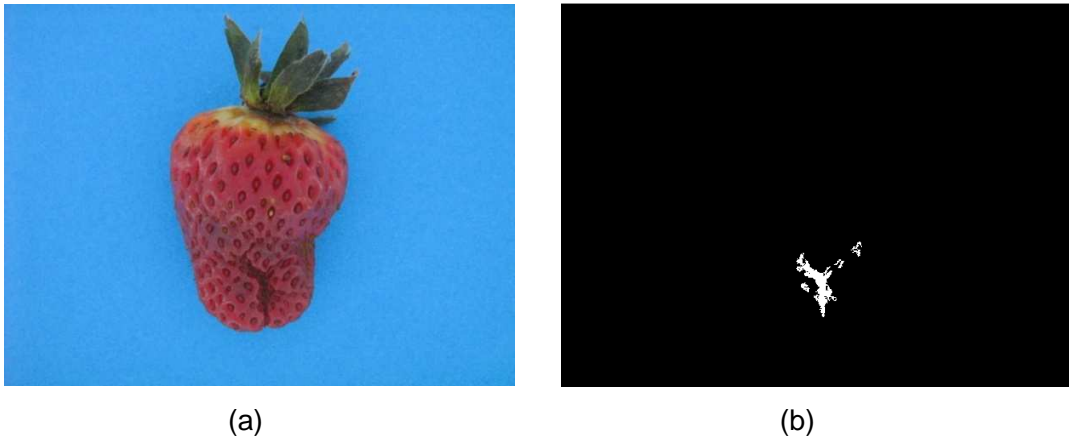
Fuente: Autores.

Figura 40. (a) Fresa con áreas sobre maduras, (b) Defecto detectado.



Fuente: Autores.

Figura 41. (a) Fresa con deficiencia de Boro, (b) Defecto detectado.



Fuente: Autores.

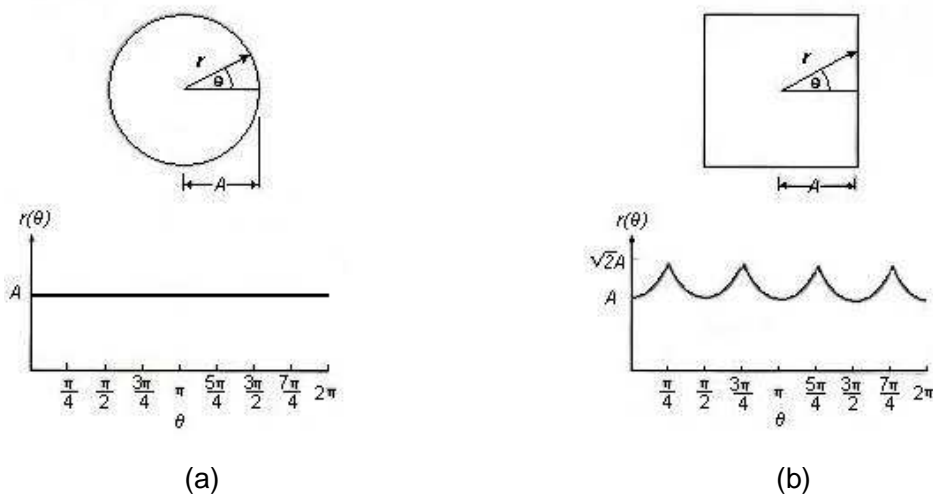
Una vez se ha detectado y segmentado este tipo de defecto se procede a calcular el área en píxeles que ocupa. Así mismo, se mide el área total de la imagen obtenida luego de la etapa de Segmentación que representa el área total de la región de interés de la fresa. Teniendo en cuenta estos datos se determina la proporción entre el área del defecto y el área total de la fresa y de esta forma es posible definir si la fresa es aceptada para el consumo fresco dentro de la Categoría II, cuando el área del defecto no es superior al 20% del área total, o si no es apta para tal fin en el caso de que el área del defecto sobrepase este límite.

#### **4.2.2 Detección de defectos de forma en el Ápice de la Fresa**

La detección de los defectos presentes en la superficie de la fresa, evidentemente, es importante para su clasificación pero no es suficiente. Puede ocurrir que la fresa no presente ningún tipo de defecto superficial pero sí una pequeña deformación en el ápice de la fruta que hace que pierda la forma característica de la fresa, lo cual es un factor determinante para su clasificación en alguna categoría (ver Figuras 1 y 2).

Un método por medio del cual se logra diferenciar la forma de una fresa sin deformación en su ápice de otra con este defecto es por medio de la Signatura [1]. Una signatura es una representación funcional 1-D de un borde y una forma de obtenerla es dibujando la distancia desde un punto en el interior de una figura, como por ejemplo el centroide, hasta el borde de la figura en función del ángulo como se muestra en la Figura 42.

Figura 42. (a) Objeto circular y su signatura, (b) Objeto cuadrado y su signatura.



Fuente: R.C. González, Digital Image Processing.

Independientemente de cómo se obtenga la signatura el propósito es reducir la frontera a una representación unidimensional, que se supone es más fácil de describir que la frontera original bidimensional.

Para obtener la signatura de las imágenes de la forma descrita, es necesario obtener primero el borde de la figura en cuestión. Es por esto que en esta etapa, como primer paso, se traza el borde de una imagen binaria de la fresa segmentada. Para este fin, se obtienen las coordenadas de los pixeles del borde de la imagen binaria. Teniendo las coordenadas de estos pixeles es

posible graficar el borde asignando a los pixeles hallados el valor de 1 y dejando un valor de 0 para el resto de pixeles. En la Figura 43 se muestra la imagen binaria de una fresa segmentada y su correspondiente borde.

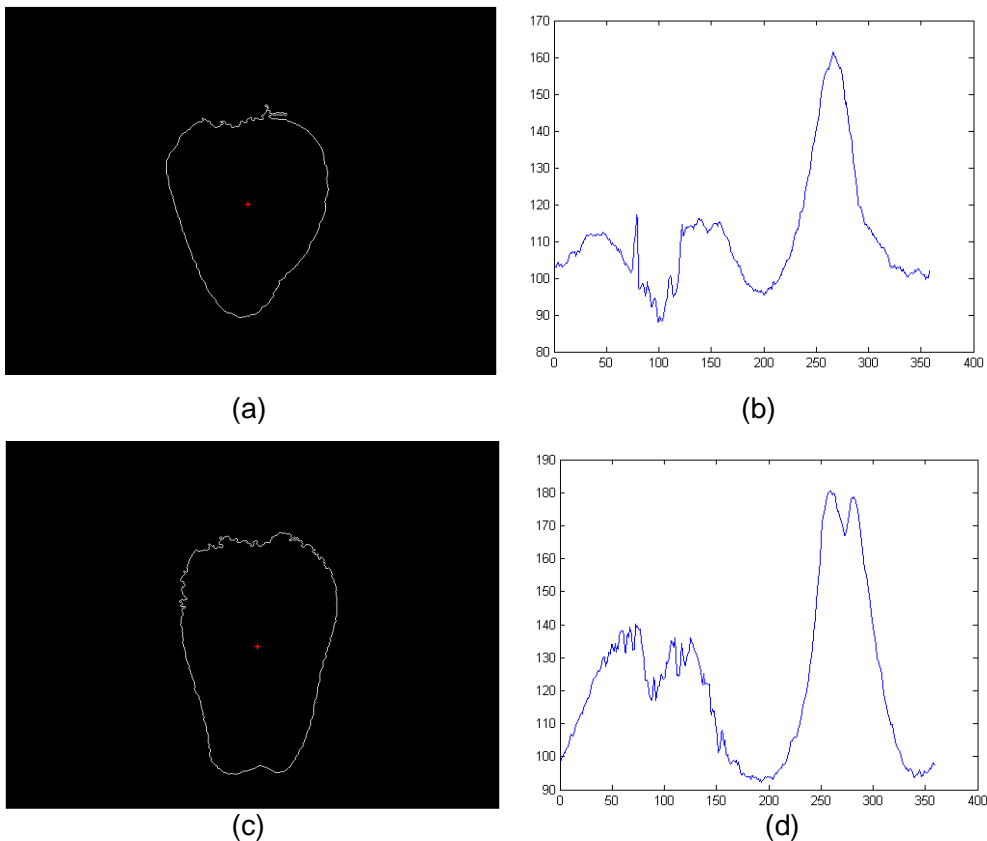
Figura 43. (a) Imagen binaria de una fresa segmentada, (b) Borde de (a).



Fuente: Autores.

Una vez se ha obtenido el borde de la figura es posible hallar su signatura. Se debe establecer primero el punto de origen a partir del cual se tomará la distancia hasta el borde de la imagen, en este caso se escoge el centroide como punto de origen. A partir de este punto se mide la distancia que hay entre él y un punto del borde que esté a  $0^\circ$  en dirección horizontal. Este ángulo se incrementa  $1^\circ$  en sentido antihorario para la siguiente medida y así continúa hasta llegar al punto de partida. De esta forma se obtienen 360 datos correspondientes a la distancia medida de una línea recta desde el centroide de la figura hasta el borde de la misma, iniciando en una posición de  $0^\circ$  y terminando en  $359^\circ$ . Teniendo estos datos se procede a graficar la amplitud de la distancia medida en función del ángulo que es lo que se ha llamado Signatura. Esto se puede apreciar en la Figura 44.

Figura 44. (a) Borde detectado y centroide para una fresa sin deformación en el ápice, (b) Signatura de (a), (c) Borde detectado y centroide para una fresa con deformación en el ápice, (d) Signatura de (c).



Fuente: Autores.

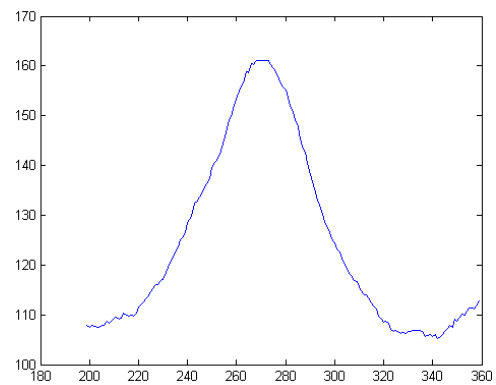
El objetivo de esta etapa, como ya se ha mencionada es que el sistema logre diferenciar entre una fresa que presente deformación en el ápice y otra que no lo presente. En la signatura, esta diferencia se verá reflejada en los picos de magnitud presentados en la mitad final de la gráfica como se observa en las Figuras 44(b) y 44(d). Teniendo en cuenta que la región de interés aquí es el ápice de la fresa y que éste toma en la signatura valores de ángulos superiores a  $200^{\circ}$ , se selecciona solo la parte de la gráfica correspondiente a ángulos mayores de  $200^{\circ}$ .

Analizando esta región seleccionada de la signatura para distintas fresas es claro que básicamente la diferencia entre las que presentan deformación y las que no la presentan, radica en que las fresas sin defecto presentan un solo pico definido mientras que las fresas con el defecto presentan dos picos definidos. A continuación se muestran algunos ejemplos.

Figura 45. (a) Fresa sin deformación, (b) Signatura de (a), (c) Fresa sin deformación, (d) Signatura de (c), (e) Fresa con deformación, (f) Signatura de (e), (g) Fresa con deformación, (h) Signatura de (g).



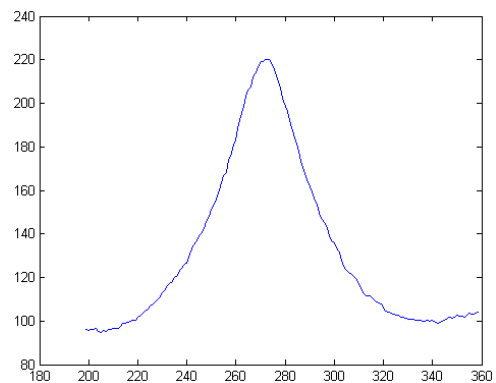
(a)



(b)



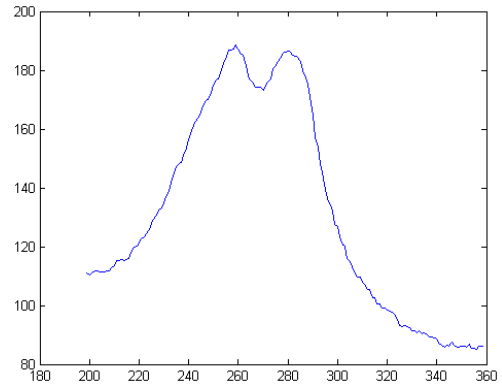
(c)



(d)



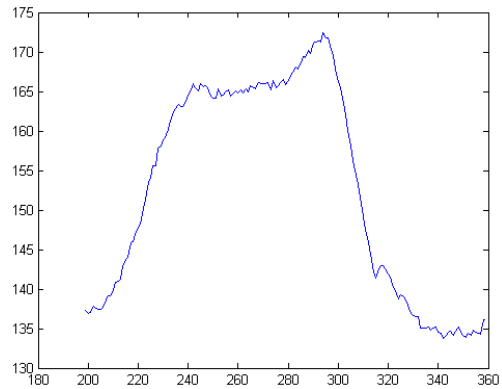
(e)



(f)



(g)



(h)

Fuente: Autores.

Al observar detenidamente la signatura tanto de fresas con deformación como de fresas sin ello, se logra determinar que las fresas sin defecto presentan el valor de amplitud máximo para un ángulo que siempre cae dentro de un intervalo establecido entre  $261^{\circ}$  y  $282^{\circ}$  mientras que para las fresas con deformación, que presentan dos picos bien definidos, independientemente de cuál de estos dos picos sea el más alto, su valor máximo en amplitud siempre corresponde a un ángulo que se encuentra fuera del intervalo anteriormente mencionado. Por este motivo, para reconocer si una fresa presenta o no el defecto, se halla el ángulo para el

cual la amplitud es máxima y si éste se encuentra dentro del intervalo que se ha comentado la fresa será considerada como sin deformación, en el caso contrario se concluye que la fresa presenta deformación en el ápice.

#### **4.2.3 Determinación del grado de madurez de la fresa**

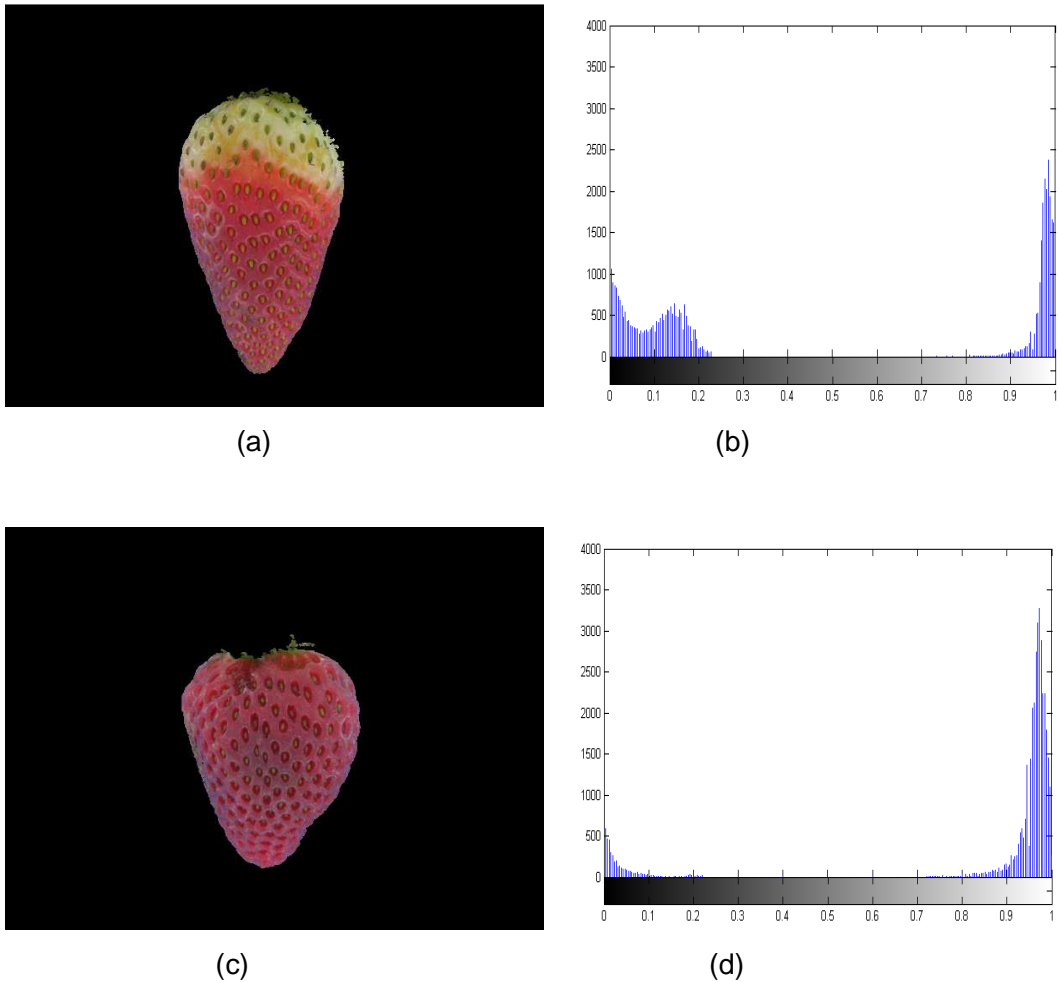
Según lo contemplado en la norma NTC 4103, el grado de madurez de la fresa puede dividirse en siete categorías según el color que presente el fruto bajo observación (ver Sección 1.1.4).

Teniendo ya la fresa segmentada, es posible establecer en qué grado de madurez se encuentra si se halla el área total de la fresa y la proporción del área de color rojo que está presente en ella. Para encontrar el área total de la fresa, basta con tomar la imagen de la fresa segmentada y medir su área en píxeles. Sin embargo, para medir el área que presenta una coloración roja es necesario caracterizar este color para luego tomar solo la región que lo contiene y poder determinar su área en píxeles.

Para lograr la segmentación de la región de la fresa que muestra un color rojo se estudiaron los tres canales del modelo HSI de la imagen de la fresa luego de la segmentación y se escoge el canal H por ser el que mejor permite separar el color rojo del resto de colores presentes en la fresa.

En la Figura 46 se observan dos fresas segmentadas, con distinta proporción de rojo, y su respectivo histograma del canal H.

Figura 46. (a) Fresa segmentada, (b) Histograma del canal H para la representación en HSI de (a), (c) Fresa segmentada, (d) Histograma del canal H para la representación en HSI de (c).



Fuente: Autores.

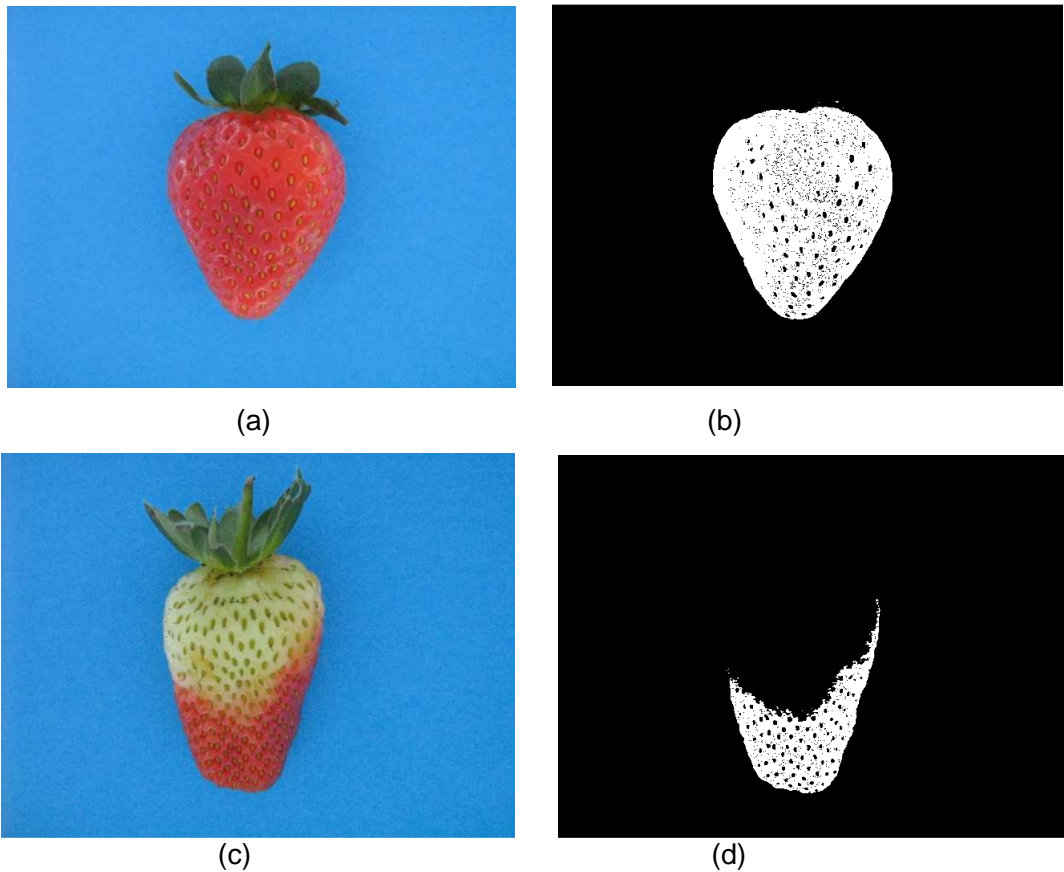
Analizando el histograma del canal H para fresas en distinto estado de maduración se observa que los valores del histograma superiores a 0.71 corresponden a algunos tonos de rojo (los rojos más oscuros) presentes en la fresa, sin embargo, no tonos los tonos de rojo que se encuentran en la fresa se ubican en esta parte del histograma. Se logra determinar que los

tonos de rojo más claros, similares al color que se aprecia en la Figura 46(a), en la parte superior de la región roja de la fresa, antes de que su color se torne verde, se ubican en la región más baja del histograma, tomando valores cercanos a cero.

Luego de un arduo análisis para diversas fresas, se logra fijar un intervalo del histograma del canal H dentro del cual se encuentra la información correspondiente a los tonos claros de rojo presentes en la fresa. Este intervalo está comprendido entre los valores de 0.001 y 0.045. Los criterios a tener en cuenta para la escogencia de estos umbrales son que el color que se quiere segmentar se ubica en los valores más pequeños del histograma, pero sin llegar a ser cero dado que éste es el valor que se le ha asignado al fondo de la imagen. El umbral superior fijado en 0.045 se debe a que hasta este punto es posible separar la mayor cantidad del tono de rojo que se busca del resto de la región de la fresa que exhibe un color verde, a partir de este umbral se empieza a encontrar la información correspondiente al color de algunas de las semillas y de la zona inmadura de la fresa.

De esta manera, para segmentar la totalidad de la región de color rojo la cual corresponde a la parte madura de la fresa, se le asigna el valor de 1 a la información contenida en dos intervalos del canal H, siendo estos intervalos los comprendidos desde 0.001 hasta 0.045 y desde 0.71 hasta 1. En la Figura 47 se pueden apreciar algunos ejemplos en los que se ha detectado la región roja de las fresas mostradas.

Figura 47. (a) Imagen de entrada, (b) Segmentación de la región roja de (a), (c) Imagen de entrada, (d) Segmentación de la región roja de (c).



Fuente: Autores.

Ahora que se ha obtenido la región roja es posible determinar su área en píxeles para compararla con el área total de la fresa. Por ejemplo, para las fresas mostradas en la Figura 47 se obtienen las siguientes medidas: para la Figura 47(a) el área total de la fresa es de 41731 píxeles y el área de la región roja segmentada es de 40005 píxeles para un porcentaje de área madura del 95,86%. Para la Figura 47(c) el área total de la fresa es de 40005 píxeles y el área de la región roja segmentada es de 13463 píxeles para un porcentaje de área madura del 33,65%.

Finalmente, para realizar la clasificación en alguno de los siete estados de maduración, se establecen previamente el mismo número de intervalos para los porcentajes de área de la región roja obtenida respecto al área total de la fresa.

$$P = \left( \frac{Area\ roja}{Area\ total} \right) * 100$$

$0 \leq P \leq 0.5$	:	Color 0
$0.5 < P \leq 12$	:	Color 1
$12 < P \leq 32$	:	Color 2
$32 < P \leq 50$	:	Color 3
$50 < P \leq 71$	:	Color 4
$71 < P \leq 89.5$	:	Color 5
$89.5 < P$	:	Color 6

Así, el intervalo al que corresponda el porcentaje encontrado, determina el grado de maduración de la fruta.

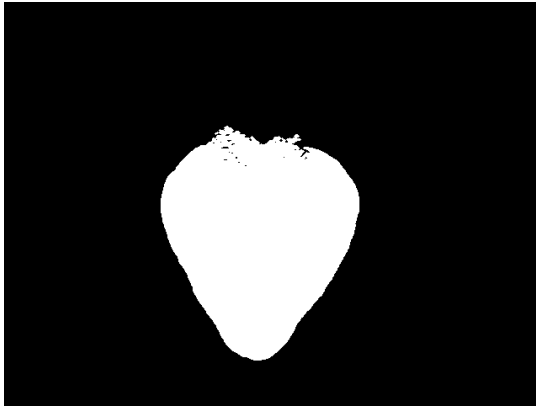
#### **4.2.4 Determinación del calibre de la fresa**

En esta etapa, el objetivo es determinar el calibre de la fresa que está establecido por la medida del diámetro máximo (cercano al cáliz) del fruto. Esta medida se halla en primera instancia en píxeles y luego se encuentra su equivalencia en milímetros de acuerdo a lo descrito a continuación.

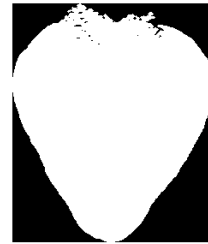
Para medir el diámetro mayor de la fresa se realiza lo siguiente. Se toma la imagen binaria de la fresa segmentada y se encuentra el rectángulo mínimo que pueda contener la región de la fresa, así pues, este rectángulo se construirá dependiendo de los valores extremos de la región, es decir, el punto más alto, el punto extremo izquierdo, el punto más bajo y el punto

extremo derecho de la región de interés. La Figura 48 ilustra mejor lo descrito anteriormente.

Figura 48. (a) Imagen binaria de la fresa segmentada, (b) Mínimo rectángulo que contiene la región de la fresa.



(a)



(b)

Fuente: Autores.

Hecho esto, se mide el ancho del rectángulo el cual indicará la medida del diámetro mayor de la fresa en píxeles.

El siguiente paso es determinar la equivalencia en milímetros de la medida obtenida. Para esto, se toma una fotografía de un cuadrado de 3cm de lado, bajo las mismas condiciones y a la misma distancia con las cuales fueron adquiridas las imágenes de las fresas y se le aplica el mismo procedimiento que se ha empleado para medir el diámetro de la fresa, esto es, se segmenta del fondo, se halla el mínimo rectángulo (en este caso un cuadrado) que lo contiene y se mide su ancho en píxeles. Como resultado se tiene que el ancho en píxeles para este cuadrado de dimensiones previamente conocidas es de 176 píxeles. De esta manera se tiene lo siguiente:

$$1 \text{ mm} = \frac{176}{30} = 5.87 \text{ píxeles}$$

Con esta relación se convierte la medida obtenida en pixeles a milímetros, permitiendo clasificar la fresa según su calibre de acuerdo a lo establecido por la Norma NTC 4103 (ver sección 1.1.3).

## 5. RESULTADOS

### 5.1 EJEMPLO DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

En este apartado se expone un ejemplo del funcionamiento del sistema mostrando los resultados obtenidos para una fresa y algunas imágenes de las etapas realizadas.

Para empezar se carga la imagen que se va a analizar. En este ejemplo se analizará la imagen mostrada en la Figura 49.

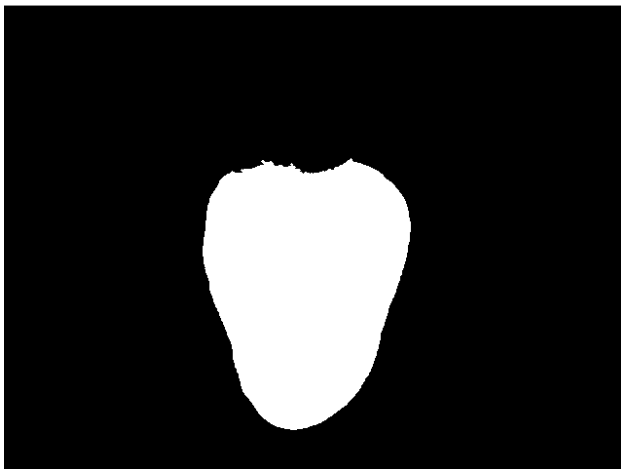
Figura 49. Imagen de entrada.



Fuente: Autores.

El siguiente paso es segmentar la imagen del fondo obteniéndose la imagen mostrada en la Figura 50.

Figura 50. Imagen segmentada.



Fuente: Autores.

A continuación se procede a detectar los defectos presentes en la fresa con lo cual se logra determinar si la fresa se debe descartar por no ser apta para el consumo en fresco o si se clasifica en una de las categoría estipuladas en la norma NTC 4103. Para esto primero se mide la proporción de defectos presentes respecto al área total de la fresa, para este ejemplo se obtiene lo siguiente:

Totaldef1 =0

Totaldef2 =0

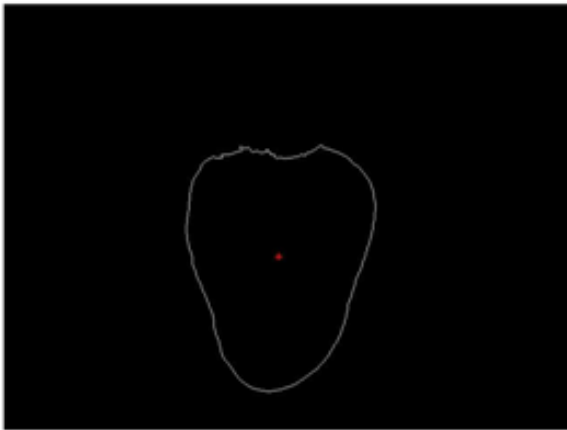
ProporcionDef =0

Donde Totaldef1 corresponde a la proporción del área total de los defectos claros, Totaldef2 corresponde a la proporción del área total de los defectos oscuros y ProporcionDef corresponde a la proporción total de área que contiene defectos respecto al área total de la fresa.

Hecho esto se mide ahora la ubicación del punto de máxima amplitud de la signatura con lo cual se determina si la fresa presenta deformación en su

ápice o no. Para este fin se detecta primero el borde de la fresa segmentada y su centroide.

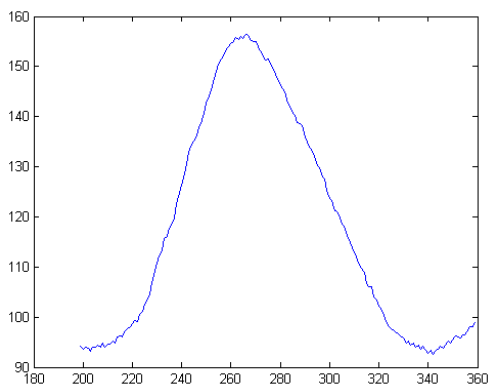
Figura 51. Borde y centroide de la fresa segmentada.



Fuente: Autores.

Ahora es posible hallar su signatura de la cual se toman solo los valores correspondientes a ángulos mayores de  $200^\circ$  que corresponden a la parte inferior de la fresa donde se encuentra su ápice.

Figura 52. Signatura de la fresa.



Fuente: Autores.

Teniendo la signatura, se halla el ángulo para el cual su amplitud es máxima. Para este caso el pico máximo se encuentra en:

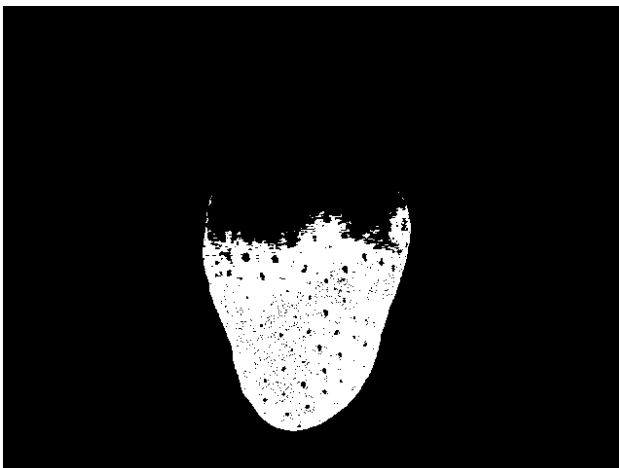
$cl = 267^\circ$

Según este valor obtenido la fresa no presenta deformación en su ápice.

Teniendo en cuenta la proporción de defectos superficiales y la forma del ápice de la fruta se determina su categoría que para este ejemplo es Categoría extra.

En seguida, se procede a determinar el grado de maduración de la fresa para lo cual se mide la proporción del área de la fresa que se encuentra madura con respecto al área total de la fresa.

Figura 53. Área madura de la fresa.



Fuente: Autores.

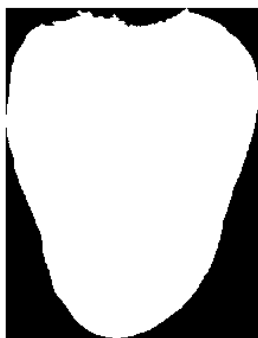
En este caso la proporción del área madura de la fresa respecto al área total es de:

$P = 71.7647\%$

Según este resultado el sistema clasifica a esta fresa en Color 5 de maduración.

Finalmente, el sistema realiza la medición del diámetro mayor de la fresa para clasificarla según su calibre. Como se describe en la sección 4.2.4, para esta medición se encuentra el rectángulo mínimo que contenga a la región de la fresa el cual se muestra en la Figura 54 y se mide el ancho de este rectángulo con lo que se obtiene el diámetro mayor de la fresa.

Figura 54. Rectángulo mínimo que contiene la región de la fresa.



Fuente: Autores.

El diámetro medido por el sistema para este ejemplo es:

Diam = 33.2566 mm

Con este diámetro la fresa se clasifica en calibre B según los rangos establecido por la norma NTC 4103.

El tiempo de ejecución para este ejemplo es:

Elapsed time is 2.074378 seconds.

Así pues, en este ejemplo el sistema clasifica la fresa en Categoría extra, maduración Color 5 y Calibre B, en un tiempo de 2.07 segundos.

## 5.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA CATEGORÍA DE LA FRESA.

Tabla 6. Clasificación según la categoría de la fresa.

Fresa	Defecto claro (% del área total)	Defecto oscuro (% del área total)	Total defectos (% del área total)	Forma (punto máximo signatura)	Categoría Sistema	Categoría visión humana
1	0	0	0	267	Extra	Extra
2	0	0	0	267	Extra	Extra
3	0	0,4055	0,4055	260	II	II
4	0,7902	0	0,7902	260	No apta	No apta
5	0	0	0	274	Extra	Extra
6	0	0	0	267	Extra	Extra
7	0	0	0	269	Extra	Extra
8	0	0	0	274	Extra	Extra
9	0	0	0	278	Extra	Extra
10	0,2768	3,1342	3,4110	270	II	II
11	0	0	0	269	Extra	Extra
12	0	2,7084	2,7084	265	II	II
13	0	1,2961	1,2961	258	II	II
14	0,6557	0	0,6557	269	No apta	No apta
15	0	0	0	273	Extra	Extra
16	0	0	0	273	Extra	Extra
17	0,2064	0,8685	1,0749	266	II	II
18	0	0	0	279	Extra	Extra
19	0	0	0	275	Extra	Extra
20	0	0	0	279	Extra	Extra
21	0,0783	1,1170	1,1952	273	II	II
22	0	0	0	268	Extra	Extra
23	0	0	0	266	Extra	Extra
24	0	2,4344	2,4394	273	II	II
25	0	0	0	296	I	I
26	0	0	0	273	Extra	Extra
27	0	0	0	266	Extra	Extra
28	0	0	0	273	Extra	Extra
29	0	0	0	275	Extra	Extra
30	0	1,0456	1,0456	270	II	II
31	0	5,5467	5,5467	271	II	II
32	0	0	0	270	Extra	Extra
33	0	0	0	270	Extra	Extra
34	0	0	0	275	Extra	Extra
35	0	0	0	266	Extra	Extra
36	0	0	0	269	Extra	Extra

Tabla 6. (Continuación)

<b>Fresa</b>	<b>Defecto claro (% del área total)</b>	<b>Defecto oscuro (% del área total)</b>	<b>Total defectos (% del área total)</b>	<b>Forma (punto máximo signatura)</b>	<b>Categoría Sistema</b>	<b>Categoría visión humana</b>
37	26,1635	37,2113	63,3748	270	No apta	No apta
38	0,4243	2,8598	3,2841	268	No apta	No apta
39	0	0	0	290	I	I
40	0	0,6161	0,6161	246	II	II
41	0	2,2341	2,2341	276	II	II
42	0	0,3085	0,3085	272	II	II
43	0,7320	3,8539	4,5859	274	No apta	No apta
44	0	0	0	266	Extra	Extra
45	0	0	0	287	I	I
46	0	0	0	257	I	I
47	0	2,8218	2,8218	275	II	II
48	0	0	0	271	Extra	Extra
49	0,4093	6,0067	6,4161	277	No apta	No apta
50	0	0	0	254	I	I
51	0,1419	0,8643	1,0062	273	II	II
52	0	0	0	282	Extra	Extra
53	0	0	0	261	Extra	Extra
54	0,1327	4,0774	4,2101	279	II	II
55	5,4796	17,3230	22,8026	273	No apta	No apta
56	0,1442	1,5909	1,7351	252	II	II
57	0	0	0	287	I	I
58	0	0	0	269	Extra	Extra
59	0	0	0	257	I	I
60	0	0,2000	0,2000	270	II	II
61	0	0	0	265	Extra	Extra
62	12,7926	36,6566	49,4492	275	No apta	No apta
63	0	0	0	277	Extra	Extra
64	1,8109	15,2064	17,0174	266	No apta	No apta
65	0	2,2974	2,2974	275	II	II
66	0	0	0	266	Extra	Extra
67	0	0	0	267	Extra	Extra
68	4,0896	18,7215	22,8110	265	No apta	No apta
69	0	0,1494	0,1494	314	I	I
70	0,1072	37,0236	37,1308	265	No apta	No apta
71	4,5920	10,8545	15,4465	272	No apta	No apta
72	0	0	0	275	Extra	Extra
73	0	0	0	267	Extra	Extra
74	0	0	0	274	Extra	Extra

Tabla 6. (Continuación)

<b>Fresa</b>	<b>Defecto claro (% del área total)</b>	<b>Defecto oscuro (% del área total)</b>	<b>Total defectos (% del área total)</b>	<b>Forma (punto máximo signatura)</b>	<b>Categoría Sistema</b>	<b>Categoría visión humana</b>
75	0	0	0	274	Extra	Extra
76	0	0	0	263	Extra	Extra
77	0	0	0	269	Extra	Extra
78	0	0	0	277	Extra	Extra
79	0	0	0	288	I	I
80	0	0	0	261	Extra	Extra
81	0	0	0	273	Extra	Extra
82	0	0	0	262	Extra	Extra
83	0	0	0	275	Extra	Extra
84	0	0	0	276	Extra	Extra
85	0	0	0	262	Extra	Extra
86	0	0	0	277	Extra	Extra
87	0	0	0	268	Extra	Extra
88	0	0	0	270	Extra	Extra
89	0	0	0	275	Extra	Extra
90	0	0	0	251	I	I
91	0	0	0	263	Extra	Extra
92	0	0	0	273	Extra	Extra
93	0	0	0	268	Extra	Extra
94	0	0	0	291	I	I
95	0	0	0	249	I	I
96	0	0	0	270	Extra	Extra
97	0	0	0	271	Extra	Extra
98	0	0	0	243	I	I
99	0	0	0	261	Extra	Extra
100	0	0	0	286	I	I

Fuente: Autores.

Como se puede apreciar en la Tabla 6, el sistema es acertado en la clasificación de las fresas según sus categorías con 100% de efectividad. Cabe recordar que tanto la fresa categoría Extra como la categoría I están libres de defectos superficiales y se diferencian entre sí por la forma del ápice, de esta manera si la fresa presenta la forma característica en su ápice se clasifica como categoría Extra, en el caso contrario, si presenta una

deformación en su ápice es categoría I. También se recuerda que si la fresa presenta defectos superficiales dentro de los que se encuentran manchas ocasionadas por deficiencia de Boro, picaduras de insectos y zonas sobre maduras, siempre que éstos no ocupen más de 20% de la superficie total de la fresa ésta se cataloga como categoría II, de lo contrario la fresa no es apta para el consumo en fresco.

Es de resaltar que los defectos catalogados como “oscuros” contemplan daños como los ocasionados por deficiencia de Boro, picaduras de insectos, magulladuras o zonas sobre maduras y manchas marrones. Los defectos catalogados como “claros” corresponden a un hongo tipo moho lo cual se considera una enfermedad y la fresa que lo presente se cataloga como no apta para el consumo en fresco. Para este defecto se deja un margen de tolerancia del 0.4% de la superficie total, es decir, si se detecta algo de defecto claro menor al 0.4% de la superficie no se rechaza la fresa inmediatamente hasta no haber sumado el porcentaje total de defectos. Es adecuado dejar algún tipo de tolerancia dado que el sistema en ocasiones logra detectar un poco de este defecto claro dentro de zonas que muestran el defecto oscuro, sin embargo es una cantidad mínima, imperceptible al ojo humano por lo que no se tiene en cuenta para rechazar inmediatamente la fresa. Así mismo, para el defecto oscuro se deja un margen de aceptación del 0.15%.

### 5.3 CLASIFICACIÓN DEL ESTADO DE MADUREZ DE LA FRESA.

Tabla 7. Clasificación del estado de madurez de la fresa.

Fresa	Área roja dada por el Sistema (% del área total)	Madurez Sistema (Color según tabla de color*)	Madurez visión humana (Color según tabla de color*)
1	92,2908	6	6
2	17,8866	2	2
3	59,6427	4	4

Tabla 7. (Continuación)

<b>Fresa</b>	<b>Área roja dada por el Sistema (% del área total)</b>	<b>Madurez Sistema (Color según tabla de color*)</b>	<b>Madurez visión humana (Color según tabla de color*)</b>
4	No apta	No apta	No apta
5	63,0395	4	4
6	95,4543	6	6
7	1,2259	1	1
8	95,4399	6	6
9	40,0481	3	3
10	89,7446	6	6
11	56,0223	4	4
12	94,3968	6	6
13	94,5373	6	6
14	No apta	No apta	No apta
15	91,7690	6	6
16	79,9549	5	5
17	78,5641	5	5
18	33,6534	3	3
19	39,2564	3	3
20	46,9782	3	3
21	98,3256	6	6
22	66,3193	4	4
23	95,8641	6	6
24	75,3157	5	5
25	89,2906	5	5
26	41,5216	3	3
27	94,7008	6	6
28	41,3770	3	3
29	81,5115	5	5
30	97,2080	6	6
31	88,3495	5	5
32	62,0018	4	4
33	90,8854	6	6
34	53,0557	4	4
35	73,0190	5	5
36	76,2006	5	5
37	No apta	No apta	No apta
38	No apta	No apta	No apta
39	10,7921	1	1
40	79,7217	5	5
41	83,2274	5	5
42	77,4639	5	5
43	No apta	No apta	No apta

Tabla 7. (Continuación)

Fresa	Área roja dada por el Sistema (% del área total)	Madurez Sistema (Color según tabla de color*)	Madurez visión humana (Color según tabla de color*)
44	6,6802	1	1
45	11,6339	1	1
46	31,8292	2	2
47	71,5637	5	5
48	4,3640	1	1
49	No apta	No apta	No apta
50	91,6279	6	6
51	86,9684	5	5
52	64.2665	4	2
53	81,2711	5	5
54	96,4792	6	6
55	No apta	No apta	No apta
56	66,6940	4	4
57	85,7550	5	5
58	0,0194	0	0
59	22,8762	2	2
60	12,9710	2	2
61	41,6732	3	3
62	No apta	No apta	No apta
63	12,0540	2	2
64	No apta	No apta	No apta
65	97,4137	6	6
66	26,9545	2	2
67	0,7143	1	1
68	No apta	No apta	No apta
69	85,9883	5	5
70	No apta	No apta	No apta
71	No apta	No apta	No apta
72	56,0409	4	4
73	71,7647	5	5
74	6,6527	1	1
75	5,4466	1	1
76	49,1575	3	3
77	43,0788	3	3
78	20,6137	2	2
79	72,7900	5	5
80	28,4240	2	2
81	21,9637	2	2
82	81,3235	5	5
83	99,7104	6	6

Tabla 7. (Continuación)

<b>Fresa</b>	<b>Área roja dada por el Sistema (% del área total)</b>	<b>Madurez Sistema (Color según tabla de color*)</b>	<b>Madurez visión humana (Color según tabla de color*)</b>
84	27,5876	2	2
85	48,1669	3	3
86	76,9288	5	5
87	96,2552	6	6
88	97,2560	6	6
89	88,3837	5	5
90	94,6252	6	6
91	98,8613	6	6
92	78,5805	5	5
93	85,4545	5	5
94	34,1487	3	3
95	86,3036	5	5
96	99,1608	6	6
97	88,7329	5	5
98	88,0522	5	5
99	68,1498	4	4
100	81,3257	5	5

\* Tabla de color dada por la Norma NTC 4103 mostrada en la Figura 4, sección 1.1.4

Fuente: Autores.

Según se observa en la Tabla 7 el sistema es muy acertado en la determinación del estado de maduración de las fresas, con una efectividad del 99%.

Cabe aclarar que las fresas que no son aptas para el consumo en fresco, son descartadas en la etapa anterior y por tanto no se realizan en ellas otras mediciones como son su estado de maduración y su calibre.

## 5.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL CALIBRE DE LA FRESA

Tabla 8. Clasificación según el calibre de la fresa.

Fresa	Diámetro calibrador (mm)	Diámetro Sistema (mm)	Calibre* Sistema	Calibre* calibrador
1	35	36,32	A	A
2	29	28,83	C	C
3	31,5	31,21	B	B
4	No apta	No apta	No apta	No apta
5	33	31,72	B	B
6	35	36,83	A	A
7	29	29,51	C	C
8	35	36,32	A	A
9	38	39,39	A	A
10	28,5	29,68	C	C
11	30	30,02	B	B
12	35	34,79	A	A
13	27	28,16	C	C
14	No apta	No apta	No apta	No apta
15	34	35,13	A	A
16	33	34,45	A	B
17	34	35,98	A	A
18	30	30,36	B	B
19	35	35,13	A	A
20	33	32,23	B	B
21	33	33,43	B	B
22	30	30,19	B	B
23	34,5	34,96	A	A
24	28	29,51	C	C
25	43	44,33	A	A
26	29	28,16	C	C
27	35	36,15	A	A
28	33	32,92	B	B
29	34	36,32	A	A
30	35	35,47	A	A
31	35	35,3	A	A
32	36	37	A	A
33	39	40,75	A	A
34	34	33,59	B	A
35	36	37,86	A	A
36	37	37,69	A	A
37	No apta	No apta	No apta	No apta

Tabla 8. (Continuación)

Fresa	Diámetro calibrador (mm)	Diámetro Sistema (mm)	Calibre* Sistema	Calibre* calibrador
38	No apta	No apta	No apta	No apta
39	30,5	29,85	C	B
40	30,5	30,36	B	B
41	37,5	40,24	A	A
42	37,5	39,73	A	A
43	No apta	No apta	No apta	No apta
44	29,5	26,95	C	C
45	30	31,38	B	B
46	30	31,21	B	B
47	30	31,21	B	B
48	26,5	25,25	C	C
49	No apta	No apta	No apta	No apta
50	29	29,51	C	C
51	34,5	36,66	A	A
52	26	26,44	C	C
53	30	30,87	B	B
54	28	27,12	C	C
55	No apta	No apta	No apta	No apta
56	34	35,30	A	A
57	30,2	32,06	B	B
58	25	25,25	C	C
59	28,5	28,83	C	C
60	30	32,75	B	B
61	27	26,61	C	C
62	No apta	No apta	No apta	No apta
63	29	27,63	C	C
64	No apta	No apta	No apta	No apta
65	29	28,49	C	C
66	27	27,46	C	C
67	30	29,85	C	B
68	No apta	No apta	No apta	No apta
69	31	32,23	B	B
70	No apta	No apta	No apta	No apta
71	No apta	No apta	No apta	No apta
72	32	33,59	B	B
73	32	33,26	B	B
74	34	34,45	A	A
75	31,5	31,38	B	B
76	33,5	33,43	B	B
77	31,5	32,23	B	B

Tabla 8. (Continuación)

Fresa	Diámetro calibrador (mm)	Diámetro Sistema (mm)	Calibre* Sistema	Calibre* calibrador
78	33	32,58	B	B
79	34,5	33,77	B	A
80	35,5	35,81	A	A
81	32,5	32,58	B	B
82	35	35,81	A	A
83	34,5	35,47	A	A
84	34	35,30	A	A
85	33,5	33,94	B	B
86	33	33,43	B	B
87	34	35,64	A	A
88	36	37,35	A	A
89	31	30,87	B	B
90	36,5	36,15	A	A
91	30	31,21	B	B
92	29	27,29	C	C
93	33	33,09	B	B
94	40	42,79	A	A
95	41	43,13	A	A
96	31,5	31,55	B	B
97	35	35,81	A	A
98	37,5	37,69	A	A
99	37	38,88	A	A
100	41	41,09	A	A
78	33	32,58	B	B
79	34,5	33,77	B	A
80	35,5	35,81	A	A
81	32,5	32,58	B	B
82	35	35,81	A	A
83	34,5	35,47	A	A
84	34	35,30	A	A
85	33,5	33,94	B	B
86	33	33,43	B	B
87	34	35,64	A	A
88	36	37,35	A	A
89	31	30,87	B	B
90	36,5	36,15	A	A
91	30	31,21	B	B
92	29	27,29	C	C
93	33	33,09	B	B
94	40	42,79	A	A

Tabla 8. (Continuación)

<b>Fresa</b>	<b>Diámetro calibrador (mm)</b>	<b>Diámetro Sistema (mm)</b>	<b>Calibre* Sistema</b>	<b>Calibre* calibrador</b>
95	41	43,13	A	A
96	31,5	31,55	B	B
97	35	35,81	A	A
98	37,5	37,69	A	A
99	37	38,88	A	A
100	41	41,09	A	A

\* Calibre de acuerdo a la Norma NTC 4103 según se muestra en la Tabla 1, sección 1.1.3.

Fuente: Autores.

Se observa en la Tabla 8 que el sistema realiza una medición del diámetro mayor de la fresa muy cercana a la efectuada manualmente, lo que permite realizar una adecuada clasificación de la fresa según su calibre con una efectividad del 95%.

Se observa también que en los casos en que el sistema falla, la diferencia entre la medida del diámetro manual y la medida del diámetro realizada por el sistema es muy pequeña, inferior a 1mm en su mayoría, pero al estar estas medidas cercanas a los umbrales de decisión entre un intervalo y otro se puede producir el error dado.

## 6. CONCLUSIONES

- El procesamiento digital de imágenes permite elaborar un método no invasivo con el cual es posible inspeccionar y clasificar las fresas según sus exigencias de calidad en cuanto a defectos, maduración y calibre de acuerdo a lo contemplado en la norma NTC 4103, emulando el criterio del ojo humano.
- Los resultados obtenidos con el sistema implementado demuestran la eficacia del mismo presentando una efectividad mínima del 95% en el caso de la clasificación según el calibre de la fresa, 99% en la clasificación según el estado de madurez y 100% para la clasificación según la categoría de la fresa.
- La etapa de adquisición de las imágenes donde se incluye el sistema de iluminación utilizado es absolutamente importante para el desarrollo del procesamiento digital de las imágenes. Gracias a esta etapa es posible prescindir de una etapa de Preprocesamiento puesto que las imágenes obtenidas están libres de factores externos indeseados como sombras o brillos y muestran colores que reflejan lo observado en la escena real con suficiente contraste para separar unos de otros. Prescindir de esta etapa reduce el coste computacional y el tiempo de ejecución.
- La utilización de algoritmos de procesamiento digital de imágenes optimiza el proceso de control de calidad en fresas al permitir el desarrollo de sistemas efectivos en la clasificación, los cuales mantienen un criterio de selección constante sin verse afectados por factores como el cansancio y la fatiga visual como ocurre con los operadores humanos.

- El trabajo muestra que es posible realizar la detección de defectos superficiales como hongos y manchas en la fresa, de una manera acertada, por medio de la caracterización del color de dichas imperfecciones. De igual forma se hace posible la detección del área madura de la fresa gracias al color exhibido en la zona señalada.
  
- La segmentación por umbralización de un color particular en una imagen se facilita en la medida en que se seleccione un espacio de color adecuado que permita diferenciar en el histograma de alguno de sus canales entre un color y otro.
  
- El sistema resulta efectivo no solo en el proceso de clasificación de las fresas según sus propiedades sino también en el tiempo de ejecución. El tiempo que toma la inspección oscila entre 1.7 segundos y 2.1 segundos aproximadamente, lo cual es aceptable en comparación con lo que tardaría un operador humano, teniendo en cuenta que no solo se clasifica la fresa como apta o no para el consumo en fresco, sino además en categorías, según su estado de maduración y su calibre.

## 7. RECOMENDACIONES

- Procurar capturar múltiples imágenes para cada fresa con el fin de realizar una inspección que abarque lo máximo posible la superficie total del fruto.
- Estudiar la forma de lograr que el sistema funcione correctamente independientemente de la orientación de la fresa al momento de la captura de la imagen.
- Realizar la adquisición de las imágenes de forma tal que sea posible una inspección en tiempo real, para que de esta manera la salida que genera el sistema indicando la calidad del fruto observado sea aprovechada para manipulación de la maquinaria que distribuye la fruta en distintos empaques, logrando así avanzar hacia la automatización completa del proceso de control de calidad de fresas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. C. GONZÁLEZ y R.E. WOODS. Digital Image Processing. 2th edition, New Jersey, EUA, Prentice-Hall, 2002.
- [2] J. C. RUSS. The Image Processing Handbook, 5th edition. Boca Raton, EUA, CRC. Press, 2007.
- [3] J. F. VÉLEZ, A. B. MORENO, A. SÁNCHEZ y J. L. ESTEBAN. Visión por computador, 2ª edición, Ed. Dykinson y Serv. Publicaciones de la Universidad Rey Juan Carlos URJC. España, 2003.
- [4] C. PLATERO. Apuntes de visión artificial. Servidor de páginas web de electrónica, automática e informática industrial. Universidad Politécnica de Madrid, España. [en línea] Disponible en: <http://www.elai.upm.es/> [Fecha de consulta: 10 de Febrero de 2009].
- [5] J. M. ROJAS, A. E. PEÑUELA y otros, Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Centro Nacional de Investigaciones de Café CENICAFÉ, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Bogotá, Colombia. 2004.
- [6] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 4103. Frutas Frescas. Fresa Variedad Chandler. Especificaciones. Bogotá 1997.
- [7] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN ICONTEC. Bogotá, Colombia. ICONTEC, 2009. [en línea]. Disponible en: <http://www.icontec.org.co> [Fecha de consulta: 20 de Febrero de 2009].
- [8] E. M. YAHIA. Fisiología y tecnología poscosecha de productos hortícolas. México. Limusa S.A. 1992. 37 – 41 p.
- [9] ASOHOFRUCOL. Frutas y hortalizas de Colombia para el mundo. Bogotá, Asohofrucol, 2009. [en línea]. Disponible en: <http://frutasyhortalizas.com.co> [Fecha de consulta: 20 de Febrero de 2009].
- [10] F. G. ORTIZ. Procesamiento morfológico de Imágenes en Color. Aplicación a la Reconstrucción Geodésica. Tesis de doctorado.

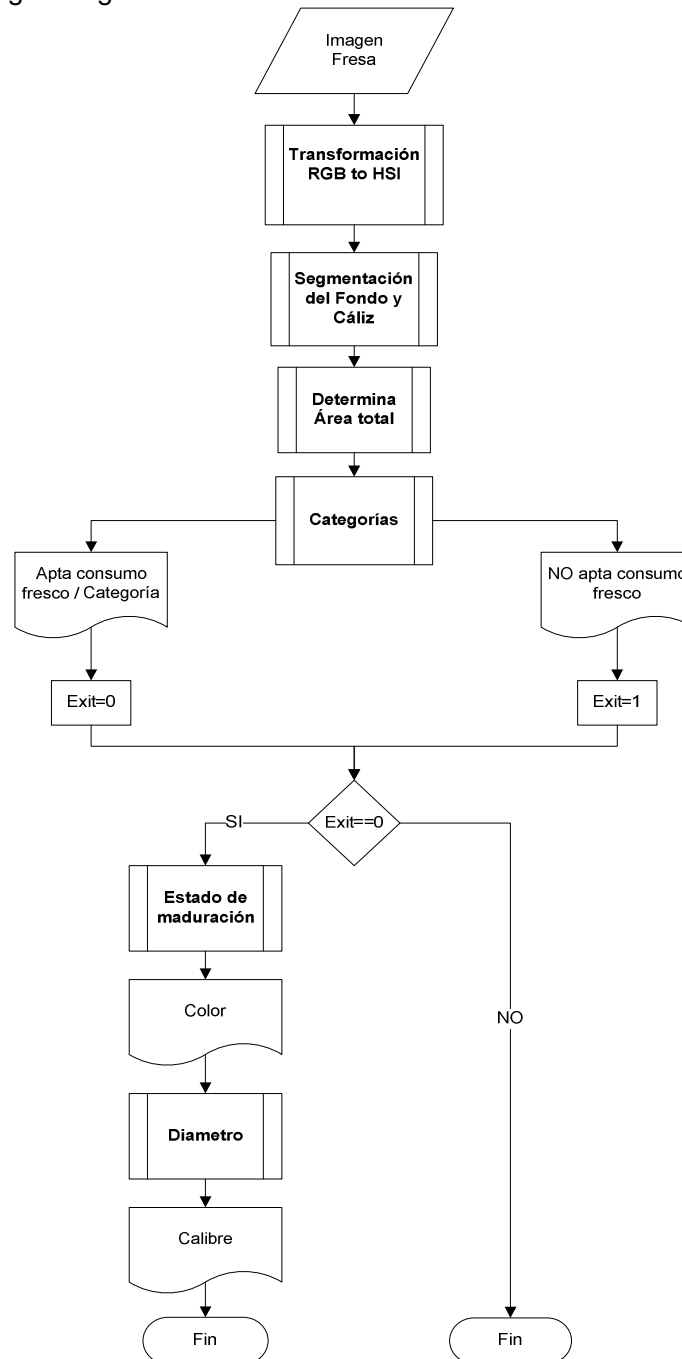
Departamento de física, ingeniería de sistemas y teoría de la señal  
Universidad de Alicante. España. 2002.

- [11] R. MOLINA. Introducción al Procesamiento y Análisis de imágenes Digitales. Departamento de ciencias de la computación. Universidad de Granada, España. 1998.
- [12] Imagen Digital. [en línea] Disponible en: <http://www.gusgsm.com/> [Fecha de consulta: 10 de Marzo de 2009].
- [13] G. PAJARES, J. M. DE LA CRUZ. Visión por Computador. Imágenes digitales y aplicaciones. 1a. edición. Alfaomega Grupo Editor. Ra-Ma, México, 2001
- [14] CÁTEDRA: VISIÓN ARTIFICIAL. Universidad Nacional de Quilmes. Departamento de ciencia y tecnología. Ingeniería en Automatización y control industrial. Argentina. Agosto de 2005. [en línea] Disponible en: <http://iaci.unq.edu.ar/materias/vision/> [Fecha de consulta: 01 de Diciembre de 2008].
- [15] GUÍA DE USUARIO DE LA CÁMARA. Versión avanzada. Canon PowerShot A430 Digital Camera. Canon inc. 2006.
- [16] ILLUMINATION STRUCTURE SOLVES MULTITUDES OF APPLICATIONS. [en línea] Disponible en: <http://www.illuminationtech.com/> [Fecha de consulta: 01 de Diciembre de 2008].
- [17] R. C. GONZÁLEZ y R.E. WOODS. Digital Image Processing using MATLAB<sup>®</sup>. 2th edition, New Jersey, EUA, Prentice-Hall, 2004.
- [18] THE MATHWORKS<sup>™</sup>. Image Processing. [en línea]. Disponible en: <http://www.mathworks.com/> [Fecha de consulta: 10 de Marzo de 2009].
- [19] USER GUIDE. Image Processing toolbox for use with Matlab<sup>®</sup>. Version5. The MathWorks, Inc. 2004.

## ANEXO A. DIAGRAMAS DE FLUJO DEL SISTEMA

### A.1 DIAGRAMA GLOBAL DEL SISTEMA

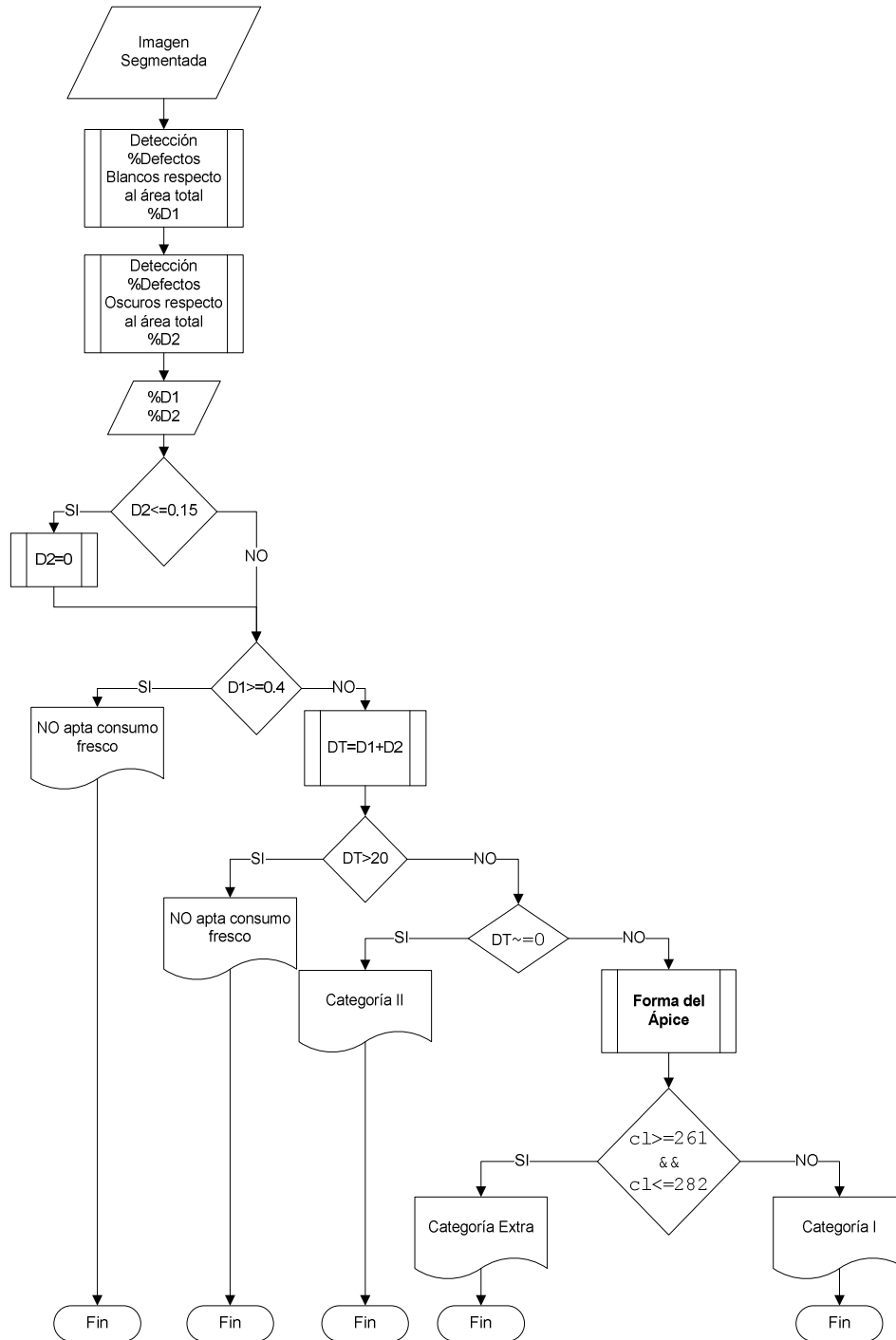
Figura A.1. Diagrama global del sistema.



Fuente: Autores.

## A.2 DIAGRAMA DE SELECCIÓN DE CATEGORÍAS

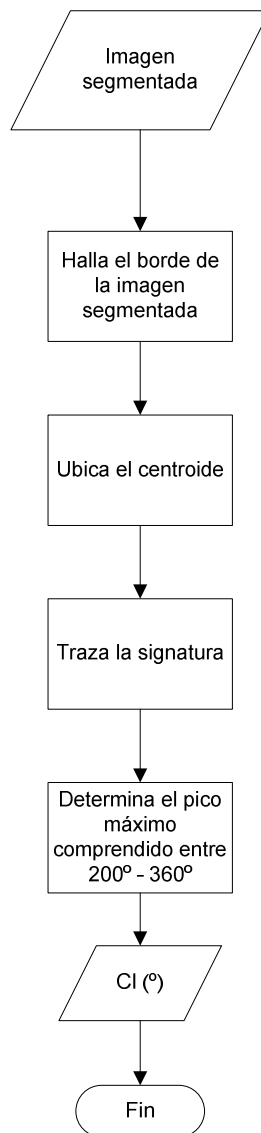
Figura A.2 Diagrama de selección de categorías.



Fuente: Autores.

### A.3 DIAGRAMA DETECCIÓN DE FORMA DEL ÁPICE DE LA FRESA

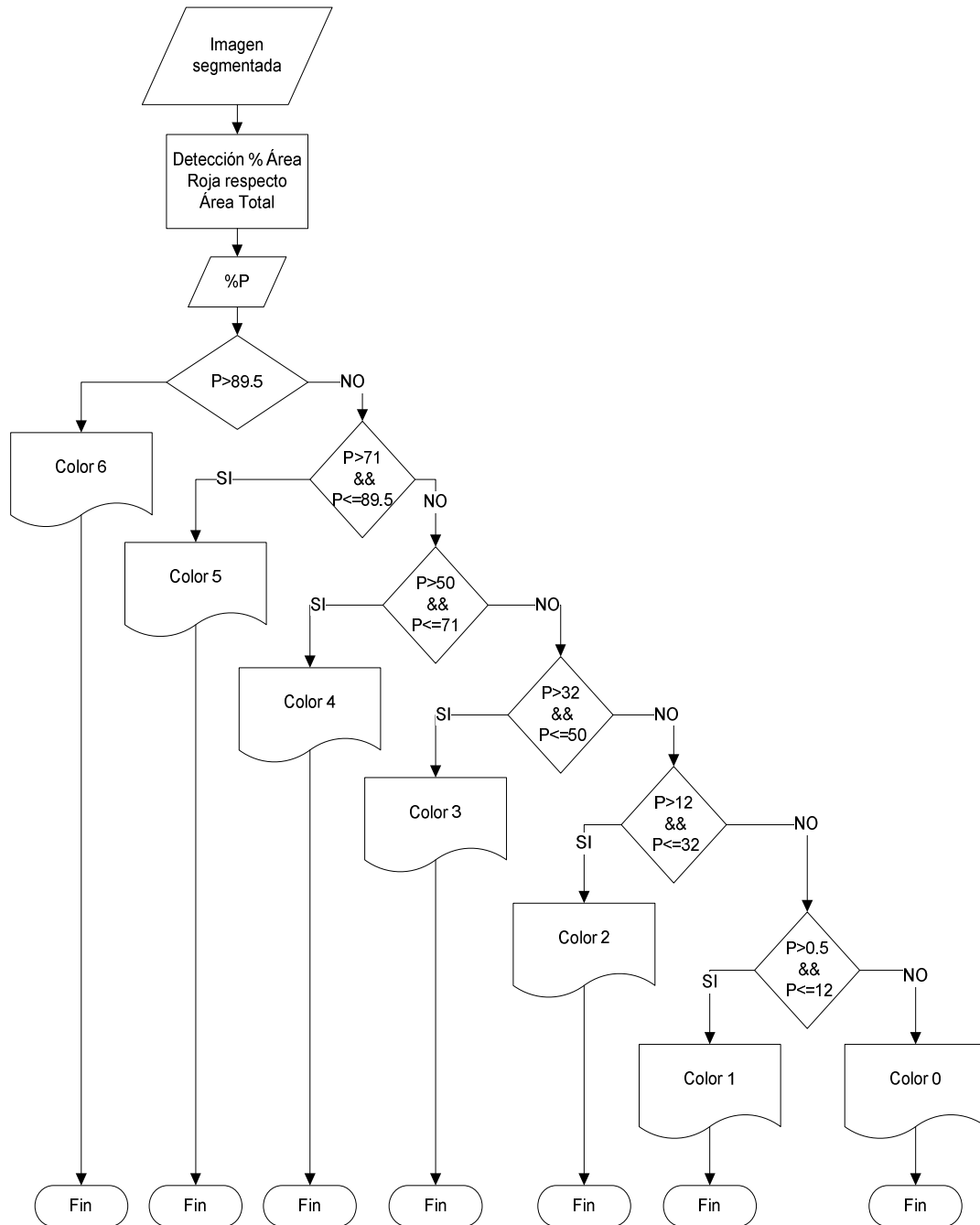
Figura A.3. Diagrama detección de forma del ápice de la fresa.



Fuente: Autores.

## A.4 DIGRAMA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE MADUREZ

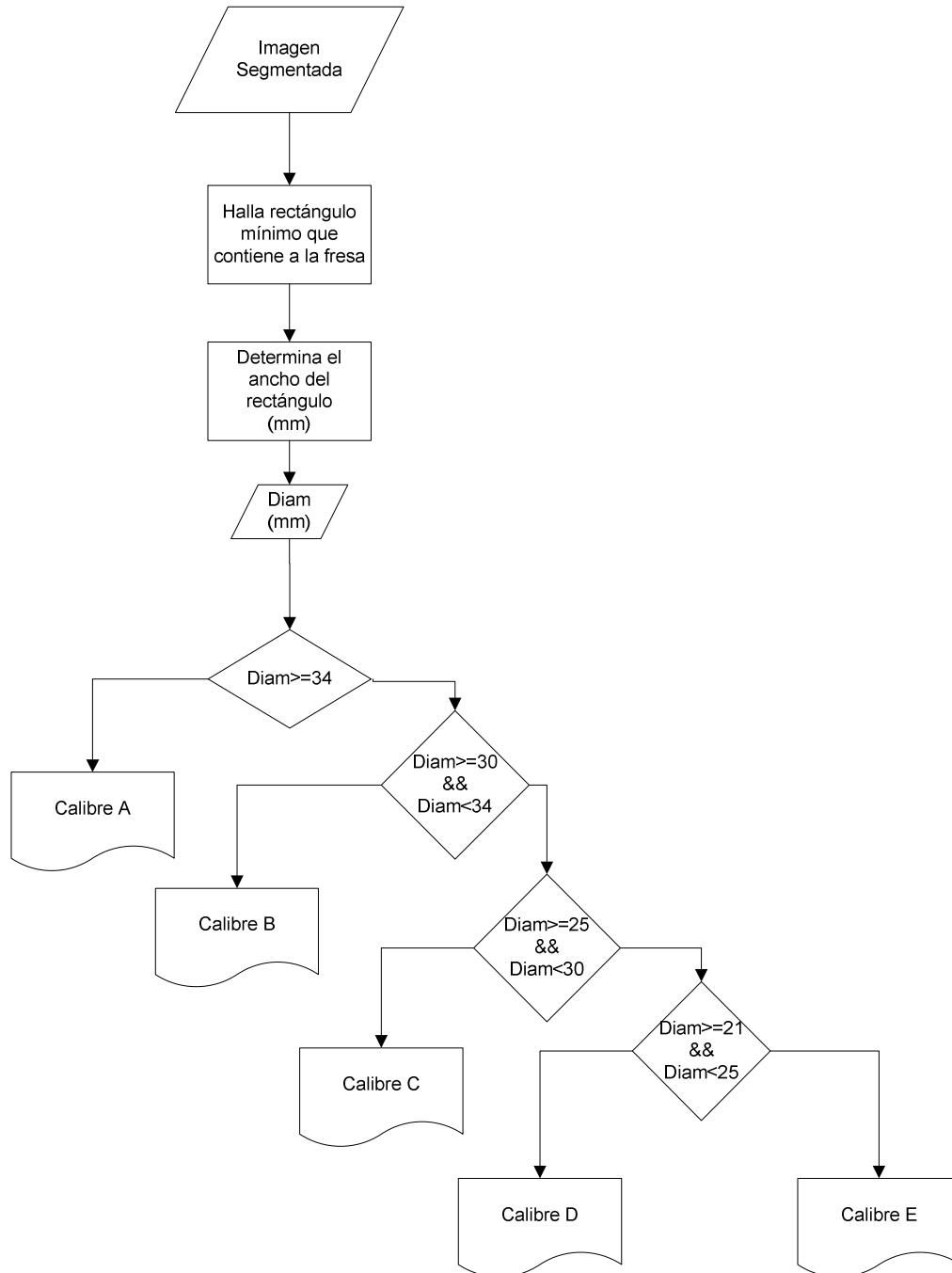
Figura A.4. Diagrama determinación del grado de madurez.



Fuente: Autores.

## A.5 DIAGRAMA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CALIBRE

Figura A.5. Diagrama para la determinación del calibre.



Fuente: Autores.

## **ANEXO B. VISIÓN HUMANA Y VISIÓN ARTIFICIAL**

### **B.1 LA CONFIANZA EN LA VISIÓN PARA OBTENER INFORMACIÓN**

Los seres humanos son criaturas principalmente visuales. Dependen de sus ojos para recibir la mayor parte de la información acerca de su entorno. La visión humana es el sentido más desarrollado y del que menos se conoce debido a su gran complejidad. Es una actividad inconsciente y difícil de saber cómo se produce.

Los Instrumentos científicos comúnmente producen imágenes para comunicar sus resultados al operador, en lugar de generar tonos audibles o emitir un olor. Casi todas las disciplinas científicas emplean útiles gráficos para transmitir conocimiento. Por ejemplo, en Ingeniería Electrónica se emplean esquemas de circuitos, a modo gráfico, para describirlos. Podría hacerse mediante texto, pero para la especie humana resulta mucho más eficiente procesar imágenes que procesar texto.

Un capítulo sobre las características de la visión humana en un proyecto que se refiere principalmente al procesamiento digital de imágenes se escuda en dos razones principales. En primer lugar, gran parte de procesamiento de las imágenes se refiere a la mejora de la visibilidad de los detalles y de las características de las mismas, y esto depende de una cierta comprensión de lo que los humanos ven en las imágenes (y lo que dan). En segundo lugar, muchos de los algoritmos para el procesamiento de imágenes y para la detección de características en escenas se basan en mayor o menor medida, en la comprensión de cómo trabajan los procesos de visión humana. Por supuesto, esa no es la única fuente de algoritmos de procesamiento. Otros métodos parecen no tener contrapartes directas en la visión humana,

algunos se basan en la física de la luz que interactúa con los objetos, y algunos son simplemente procedimientos específicos que se han desarrollado. En cualquier caso, la comprensión obtenida en el estudio de la visión humana ha sido y sigue siendo una fuente importante de métodos para el procesamiento de imágenes por ordenador.

Dada la complejidad y la amplitud de este tema, sólo se aspira a cubrir los aspectos más elementales de la visión humana, brindar un panorama que pueda ayudar a comprender cómo los seres humanos ven las cosas. En particular, el interés radica en el aprendizaje de las limitaciones físicas de la visión humana en términos de factores que también se utilizan en un trabajo con imágenes digitales. Así, los factores humanos tales como formación de imágenes en el ojo y sus capacidades para la adaptación, la comparación y la discriminación no sólo son interesantes, también son importantes desde un punto de vista práctico.

Es claro que para abordar el tema de la visión, lo primero a estudiar será la naturaleza de la luz, para luego pasar a entender cómo funciona la visión humana y acabar con las partes de la Visión Artificial.

## **B.2 NATURALEZA DE LA LUZ**

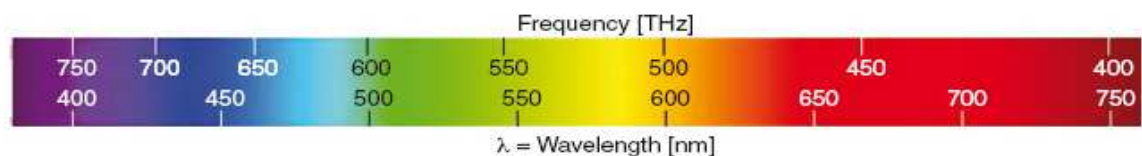
En general, desde el punto de vista del procesamiento digital de imágenes, basta considerar la luz como una onda. Según el modelo ondulatorio las características de un rayo de luz vienen completamente determinadas por dos propiedades: su amplitud y su longitud de onda. Sin embargo, el modelo ondulatorio no es el que mejor explica los fenómenos observados respecto a la luz.

Hacia 1900 se comprobó un fenómeno denominado efecto fotoeléctrico, que proporcionó evidencias experimentales de que la luz tenía carácter corpuscular en su interacción con la materia. Esto llevó al replanteamiento de la naturaleza de la luz y a una nueva teoría llamada “teoría onda-corpúsculo”. Esta teoría considera la luz formada por unas partículas, los fotones, cada una de las cuales tiene asociada una ecuación de onda. Así, cuando la luz interactúa con la materia, como en el efecto fotoeléctrico, se invoca a un modelo corpuscular para explicar tal interacción, mientras que para explicar fenómenos relativos a su propagación, se recurre a un modelo ondulatorio. Así, los fenómenos de propagación de la luz encuentran su mejor explicación dentro de la teoría ondulatoria, mientras que la acción mutua entre luz y materia, en los procesos de absorción y emisión, es un fenómeno corpuscular. Este modelo dual, onda-corpúsculo, permite explicar la totalidad de los fenómenos observados hasta la fecha.

### B.2.1 La luz como onda electromagnética

Mediante la teoría ondulatoria se sabe que cada color es en realidad una onda electromagnética de frecuencia determinada y que, al penetrar en un prisma óptico, se desvía en una dirección diferente debido a que el índice de refracción de este material varía con la frecuencia de la onda penetrante, con lo que el haz se expande de forma que las radiaciones monocromáticas, de éste incluidas, puedan ser distinguidas y observadas por el ojo humano.

Figura B.1. Parte de la radiación electromagnética que constituyen las ondas luminosas.

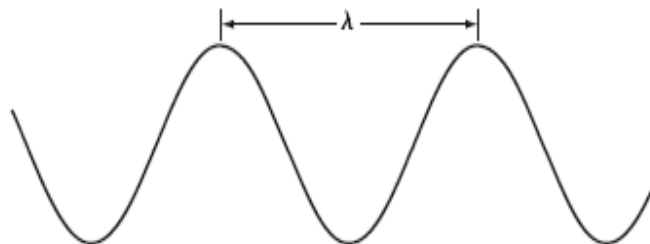


Fuente: J. C. Russ, The Image Processing Handbook.

Según la teoría ondulatoria, la luz se propaga en forma de onda que viaja en el espacio libre con una velocidad constante  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. El espectro visible es una porción muy pequeña del conjunto de ondas electromagnéticas que tiene la peculiaridad de ser captada por los ojos y procesada en el cerebro [4]. El ojo humano es capaz de distinguir radiaciones de longitudes de onda comprendidas entre los 380 nm a los 780 nm, cuyas frecuencias oscilan entre los  $3.2 \cdot 10^{14}$  Hz y los  $7.7 \cdot 10^{14}$  Hz. Al ser recibidas, interpreta las diferentes amplitudes y frecuencias, produciendo sensaciones conocidas como brillo y color respectivamente. El espectro electromagnético puede ser expresado en términos de longitud de onda, frecuencia, o energía. La longitud de onda ( $\lambda$ ) y frecuencia ( $f$ ) están relacionados por la expresión (1) donde  $c$  es la velocidad de la luz. La energía de los distintos componentes del espectro electromagnético está dada por la expresión (2), donde  $h$  es la constante de Planck.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1) \qquad E = h * f \quad (2)$$

Figura B.2. Representación gráfica de una longitud de onda.



Fuente: R.C. González, Digital Image Processing.

Las ondas electromagnéticas pueden ser visualizadas como la propagación de ondas sinusoidales con longitud de onda  $\lambda$ . Se observa en la ecuación (2)

que la energía es proporcional a la frecuencia, por lo que a mayor frecuencia, los fenómenos electromagnéticos transportan más energía por fotón. Así, las ondas de radio tienen fotones de bajas energías, las microondas tienen más energía que las ondas de radio, las infrarrojas aún más, a continuación, las ondas visibles, ultravioletas, rayos X, y por último, los rayos gamma, con más energía que todos. Esta es la razón por la cual los rayos gamma son tan peligrosos para los organismos vivos.

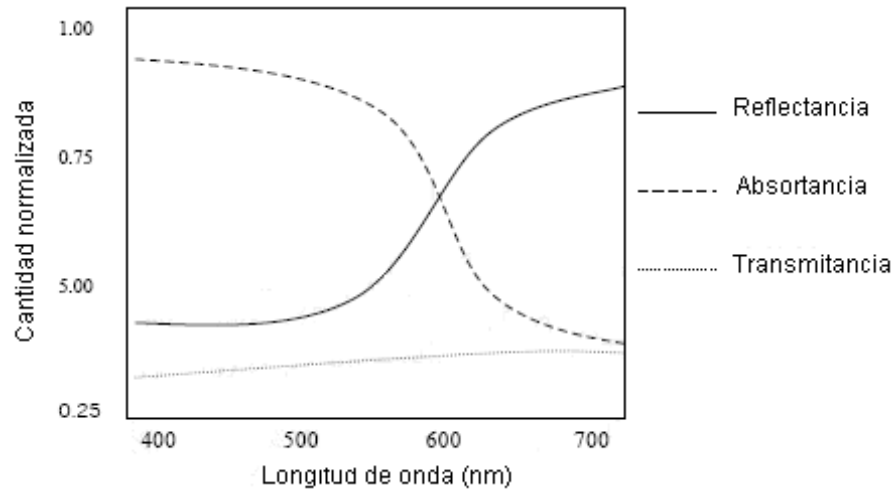
### **B.2.2 Interacción entre la luz y la materia**

Al recibir un cuerpo radiación luminosa, una parte se absorbe, otra se refleja y otra se transmite. Por el principio de conservación de la energía, el flujo luminoso incidente se iguala a los tres mecanismos mencionados.

$$\varphi \text{ Incidente} = \varphi \text{ Transmitida} + \varphi \text{ Absorbida} + \varphi \text{ Reflejada}$$

De acuerdo con la longitud de onda reflejada, transmitida o absorbida será el color con el que se percibirá el objeto. Un objeto que refleje la luz y ésta sea relativamente igual en todas las longitudes de onda visibles se percibe en blanco al observador, un cuerpo que absorbe todas las frecuencias se capta como negro. Los cuerpos opacos presentan una transmitancia muy poco significativa, siendo las frecuencias reflejadas por el objeto las que establecen con que color se percibe. En el caso de los objetos transparentes, son los valores de la reflectancia y la absortancia los que son insignificantes. Por ende, una especificación puramente objetiva del color de una superficie opaca puede expresarse en términos de reflectancia espectral. En el caso de materiales transparentes vendrá dada por la transmitancia espectral.

Figura B.3. Absortancia, reflectancia y transmitancia de un objeto opaco de color rojo.



Fuente: Procesamiento morfológico de Imágenes en Color. Aplicación a la Reconstrucción Geodésica.

### B.3 VISIÓN HUMANA, MODELO FISIOLÓGICO

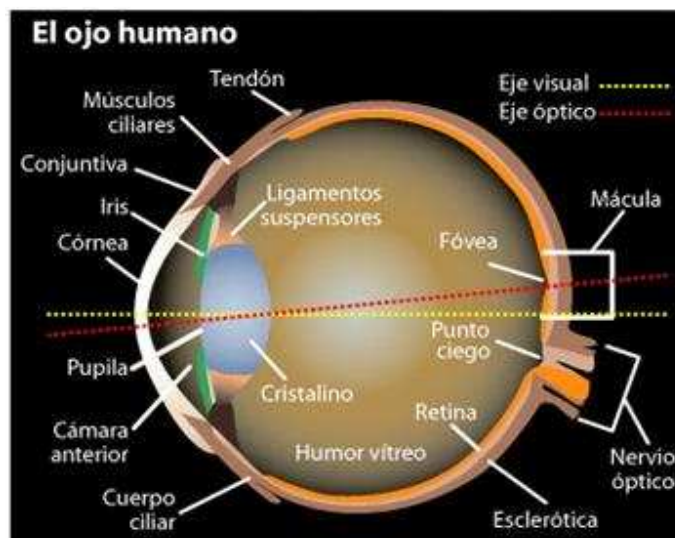
Hasta ahora se ha hablado de la luz desde un punto de vista físico. Sin embargo, la correspondencia entre los fenómenos físicos y lo que perciben nuestros sentidos no es directa. El sistema de percepción humano confunde elementos que no son iguales, y a veces encuentra diferencias entre elementos que son idénticos. Esto se debe a que nuestro sistema visual impone ciertas limitaciones.

El ojo es el elemento transductor, mientras que el cerebro es el encargado de procesar la información. El ojo se conforma de una óptica y una zona sensorial (Figura B.4). La óptica está compuesta por la córnea, el iris o pupila y el cristalino. La córnea es un material transparente y hace las veces de lente fija. La pupila regula la cantidad de luz que ingresa al interior y el cristalino actúa como una lente variable, lo que permite el enfoque de

acuerdo con la distancia de los objetos. Los músculos sujetadores del cristalino causan su deformación, y su consecuencia es el enfoque del campo visual. El objetivo de la óptica del ojo es conducir la radiación electromagnética, del espectro visible, hacia una capa de células receptoras llamada retina, que está situada en la parte posterior del glóbulo ocular y es en ella donde se ubican las células fotosensibles: los conos y los bastones. Estas células en presencia de luz generan impulsos neuronales que se envían al cerebro mediante el nervio óptico.

El cerebro procesa la información que recibe y genera sensaciones, en lo que se conoce como el proceso de percepción visual. A continuación se describe la percepción acromática (sólo teniendo en cuenta el brillo, es decir la cantidad de energía), y después la percepción cromática (que tiene en cuenta el color, esto es, la forma de distribuirse la energía en distintas longitudes de onda).

Figura B.4. Diagrama simplificado de una sección transversal del ojo humano.



Fuente: <http://www.gusgsm.com/>.

### **B.3.1 Percepción Acromática**

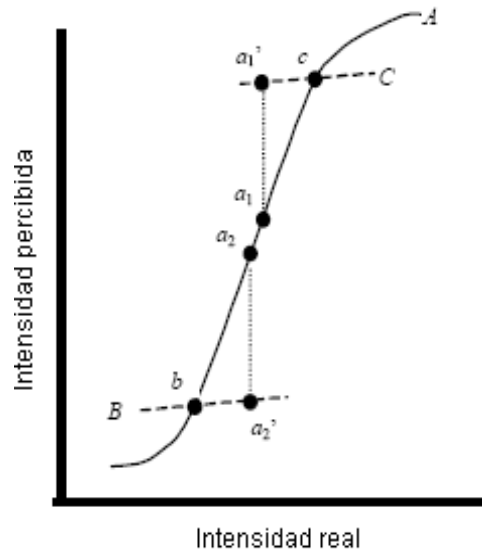
En la retina se puede distinguir una parte de gran extensión llamada mácula que está definida por los bastones. La percepción del brillo de una imagen la realizan en el ojo los bastones. Los bastones son unas células especializadas que tenemos en la retina, en un número superior a 100 millones, que son capaces de detectar y medir el brillo de los haces luminosos que les llegan. La sensación de brillo está relacionada con dos fenómenos: la sensibilidad a la intensidad y la inhibición lateral.

**B.3.1.1 Sensibilidad a la intensidad luminosa y el contraste.** La sensibilidad a la intensidad es lo que proporciona la capacidad de distinguir un nivel de intensidad de otro. La diferencia de intensidad se denomina contraste. Se dice que una escena tiene gran contraste si las diferencias de intensidad que contiene son pronunciadas.

La sensibilidad a la intensidad en el ser humano es alta siempre que los elementos que se comparan son pocos. Cuando el número de intensidades involucradas simultáneamente es superior a unos 24 tonos se pierde la mayor parte de esta sensibilidad. Esto implica que, en la mayoría de casos prácticos, sea suficiente el uso de 32 ó 64 niveles de intensidad para representar una imagen.

Los seres humanos son capaces de distinguir un rango muy amplio de intensidades. Sin embargo la relación entre la intensidad real de la luz reflejada por un pigmento y la intensidad percibida por un humano no es lineal.

Figura B.5. Representación de la relación entre el brillo distinguido por el ojo humano y el nivel de brillo real.



Fuente: J. F. VÉLEZ. Visión por Computador.

La curva A de la Figura B.5 representa el brillo apreciado en relación con el brillo físico reflejado por un pigmento. Se aprecia que el humano es capaz de distinguir pigmentos de intensidades poco diferentes (como el  $a_1$  y el  $a_2$ ) cuando los cuerpos que tienen esos pigmentos están próximos espacialmente. Sin embargo, los contrastes acentuados hacen que esta sensibilidad decrezca. Por ello, cuando hay involucrados pigmentos con intensidades muy dispares simultáneamente, como el  $b$  y el  $c$ , la distinción entre intensidades próximas decrece. De manera que la percepción de  $a_2$  y  $a_1$  se sitúa en curvas similares a la B y a la C respectivamente, que como se aprecia las hacen percibir como lejanas ( $a_1'$  y  $a_2'$ ).

En la Figura B.6 se puede comprobar este efecto. En ella se percibe que los rectángulos interiores tienen intensidades distintas, cuando en realidad tienen la misma. En conclusión, aún cuando el sistema visual puede percibir y distinguir un amplio rango de niveles de brillo, su precisión decae cuando hay

muchos niveles involucrados a la vez, necesitando periodos de adaptación para cada situación.

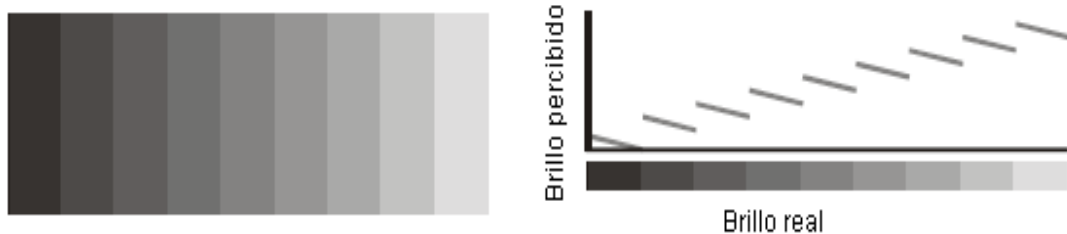
Figura B.6. Ejemplos de contraste simultáneo.



Fuente: R.C. González, Digital Image Processing.

**B.3.1.2 Inhibición lateral.** El otro fenómeno que se indicaba, la inhibición lateral, se origina en el hecho de que las células de la retina, al detectar un nivel de intensidad, inhiben las células vecinas, produciendo perturbaciones en las fronteras de cambio de intensidad. Este fenómeno, que puede apreciarse en la Figura B.7, también influye en que el brillo percibido no esté en proporción directa con el brillo físico.

Figura B.7. Inhibición lateral.



Fuente: J. F. VÉLEZ. Visión por Computador.

### **B.3.2 Percepción Cromática**

La fovea es la parte central de la retina, de menor tamaño y donde se encuentran los conos. La percepción del color de una imagen la realizan los conos. Son unas células especializadas, ubicadas en la retina en un número cercano a los seis millones, que son capaces de variar su comportamiento ante cambios en la longitud de onda de una radiación electromagnética. Con base en la información proporcionada por los conos el cerebro construye la sensación de color.

Los conos del ojo humano tienen una sensibilidad menor que los bastones. Se dice popularmente que “de noche todos los gatos son pardos”, reflejando el hecho de que con poca luz sólo los bastones captan suficiente energía para activarse [3].

El color es un rasgo del sistema de percepción humano y se relaciona con las sensaciones que recibe el ojo en el espectro visible. El color es la respuesta del sistema visual humano ante las variaciones de las longitudes de onda del espectro electromagnético visible. Estudios fisiológicos han revelado que existen tres tipos de conos, que se han denominado mediante las letras S, L, y M. Los conos de tipo S (short) son más sensibles a las radiaciones con longitud de onda corta (azules), los M (medium) a las radiaciones de longitud media (verdes), y los L (large) a las de longitud larga (rojos). Así, la sensación de color que percibimos está relacionada con la energía que tiene a diferentes longitudes de onda una radiación electromagnética. Para explicar tal relación se definen el matiz y la saturación.

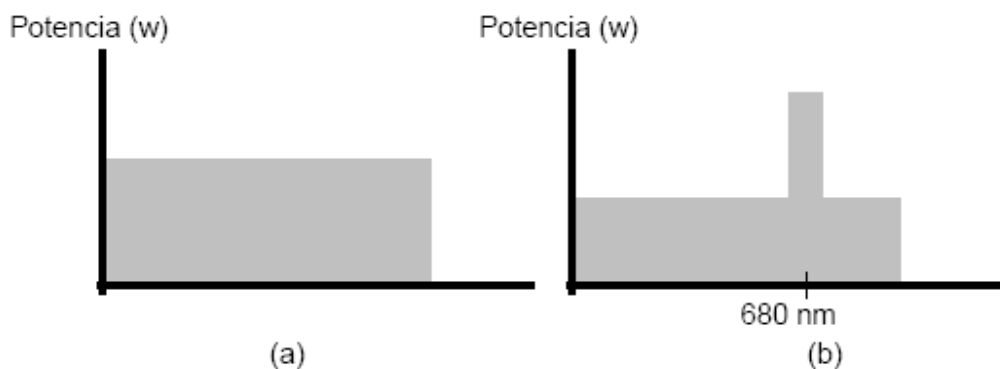
**B.3.2.1 Matiz.** Los colores que normalmente vemos no proceden de fuentes monocromáticas (y por tanto no se corresponden con una única longitud de

onda). Por ejemplo la luz blanca resulta de la suma de numerosas longitudes de ondas, o los tonos púrpuras resultan de combinar los colores rojo y azul, ambos en extremos opuestos del espectro.

El matiz o tono es un concepto que se deriva de la relación que se produce entre las activaciones de los distintos tipos de conos cuando sobre ellos incide la luz. El matiz depende de la longitud de onda dominante, es decir, aquella para la que se encuentra más energía en el diagrama espectral (ver Figura B.8). El hombre está en capacidad de diferenciar entre 125 y 150 matices distintos cuando están próximos, disminuyendo esa capacidad cuando están distanciados espacialmente.

Por otro lado se debe destacar que hay matices que producen diferente sensación de color dependiendo de la intensidad a la que estén asociados. Por ejemplo el matiz naranja, si tiene baja intensidad es percibido como marrón.

Figura B.8. (a) Figura sin una longitud de onda dominante, su matiz es blanco. (b) Figura correspondiente a un objeto rojo, siendo la longitud de onda dominante la correspondiente a 680 nm.

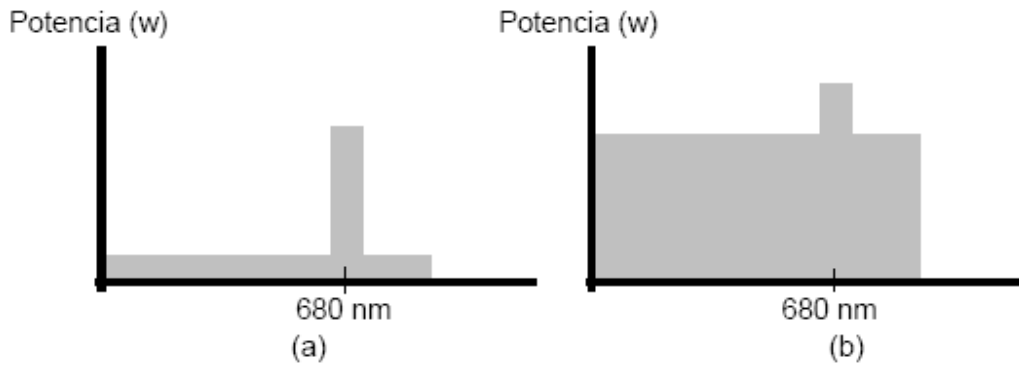


Fuente: J. F. VÉLEZ. Visión por Computador.

**B.3.2.2 Saturación.** Mide la proporción entre la longitud de onda dominante y el resto de longitudes de onda. En la Figura B.9 se presenta un ejemplo de

dos diagramas espectrales con el mismo matiz, pero con diferente saturación.

Figura B.9. Dos espectros con el mismo matiz. El de la izquierda corresponde a un rojo muy saturado. El de la derecha a una luz roja poco saturada.

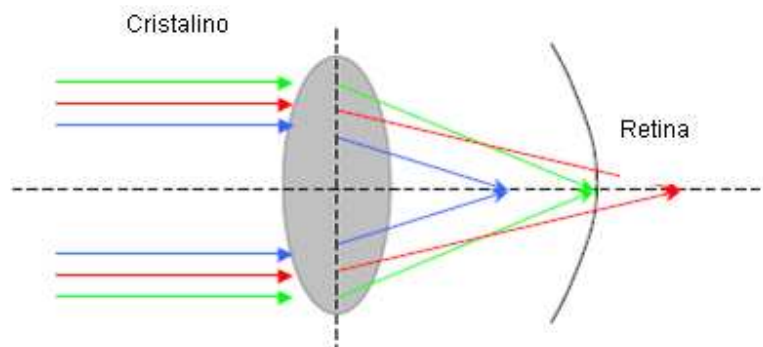


Fuente: J. F. VÉLEZ. Visión por Computador.

Definidos los conceptos de matiz, saturación y brillo se dice que se ve un color determinado cuando se percibe una cierta combinación de estos tres elementos.

### B.3.3 Distorsión cromática

Figura B.10. Refracción desigual de luz roja, verde y azul en la retina.



Fuente: Procesamiento morfológico de Imágenes en Color. Aplicación a la Reconstrucción Geodésica.

La sensibilidad de cada cono no es precisamente la misma en cada parte del espectro fijado. Concretamente, los conos azules son los menos sensibles, mientras que los conos verdes son los más sensibles. Otro punto que se debe considerar es la refracción de los rayos luminosos que penetran en la retina. No todos influyen de igual forma. La luz de alta frecuencia (azul) focaliza en un punto anterior a la retina, mientras que las bajas frecuencias (rojos) lo hacen en puntos posteriores. Esto tiene que hacer que los detalles rojos o azules no se puedan diferenciar límpidamente en una escena. El caso inverso se da con los verdes, cuyo punto de convergencia o focalización se ubica precisamente en la retina, lo que produce una mejor resolución del ojo para estas tonalidades.

Cuando la señal luminosa se ha transformado en pulsos eléctricos gracias a los conos y bastones, éstos se transportan al cerebro por medio de los nervios ópticos. Los pulsos son llevados al lóbulo occipital, donde se encuentra el córtex visual. Es una zona de  $24 \text{ cm}^2$  con  $1.5 \cdot 10^8$  neuronas. Al hemisferio derecho llega la información del ojo izquierdo y viceversa. En el cerebro se desarrolla la de extracción de las características de la imagen. Para este fin existen zonas especializadas que responden mejor a un tipo de característica que a otras.

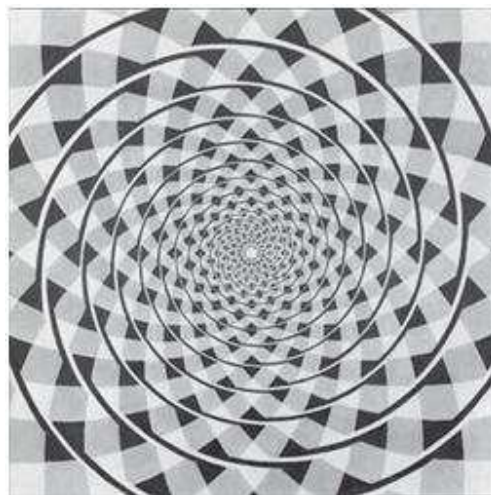
#### **B.4 ILUSIONES, AMBIGÜEDADES E INCONSISTENCIAS**

La posibilidad de errar o engañarse del sistema de visión humano ha sido demostrada ampliamente por la existencia de ilusiones visuales, ambigüedades e inconsistencias. Ilusiones ópticas, en las que el ojo no se llena de la información existente o no percibe las propiedades geométricas de los objetos.

El mundo natural no consiste simplemente de líneas y puntos, sino que se compone de objetos que están representados por conexión de ellos. La Interpretación de los elementos en una escena se basa en gran medida de su agrupación para formar características y objetos. El sistema de visión humano realiza esta agrupación naturalmente, y por lo general es difícil separar una escena o su estructura, en las partes que la conforman. Así, las ilusiones son muy útiles para ilustrar la manera en que esta agrupación funciona.

Un ingenioso ordenamiento de los datos da lugar a la ilusión se muestra en la Figura B.11, el espiral de Fraser. La ilusión se produce mediante segmentos de líneas curvas ligeramente desviados, de esta manera toda la figura se percibe como una espiral. Pero, en realidad, las líneas son círculos, como puede comprobarse por la localización en torno a uno de ellos.

Figura B.11. Espiral de Fraser.

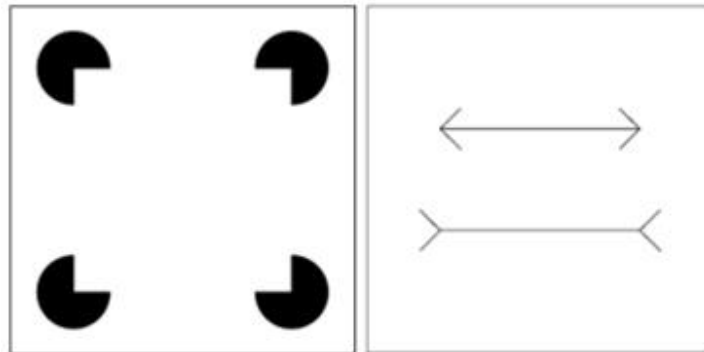


Fuente: J. C. Russ, The Image Processing Handbook.

Existen otros ejemplos de ilusiones ópticas como los que se muestran en la Figura B.12. A la izquierda el contorno de un cuadrado se ve claramente, a

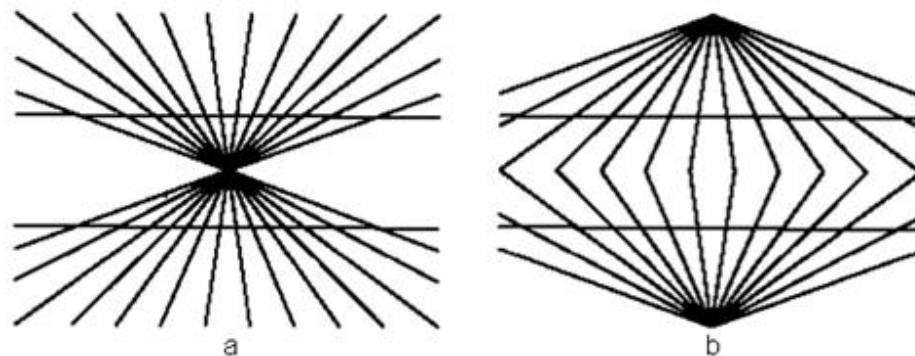
pesar del hecho de que las líneas no están definidas. A la derecha, los dos segmentos de línea horizontales tienen la misma longitud, pero una parece más corta que la otra. En la figura B.13 las líneas rectas parecen curvas.

Figura B.12. Algunas ilusiones ópticas conocidas.



Fuente: R.C. González, Digital Image Processing.

Figura B.13. (a) Ilusión de Hering. (b) Ilusión de Wundt.



Fuente: R. Molina, Introducción al Procesamiento y Análisis de imágenes Digitales.

El sistema de visión humano no mide ángulos con transportadores mentales, pero si los compara y nota sus diferencias. Una diferencia de ángulo se amplifica al detectar las fronteras y al aumentar la percepción de cambio. En la ausencia de marcas en el dial de un reloj de pulsera, decir la hora al

minuto más cercano es de lo mejor que puede hacer. Un minuto equivale a  $6^\circ$  de movimiento de la aguja de los minutos. Pero si hay un par de líneas que varían solo en unos pocos grados, puede detectar la diferencia y por lo general la considera mucho más grande.

Resulta difícil o imposible comparar correctamente el ángulo de las líneas diagonales con pequeñas marcas  horizontales o verticales que se muestran en la Figura B.14, ya que estas alteran nuestra percepción de la orientación de la línea principal. Verdaderamente están orientadas a  $45^\circ$ , son equidistantes y paralelas. Sin embargo, la imagen crea la ilusión de que las líneas están lejos de ser paralelas.

Figura B.14. Ilusión de John Zollner.



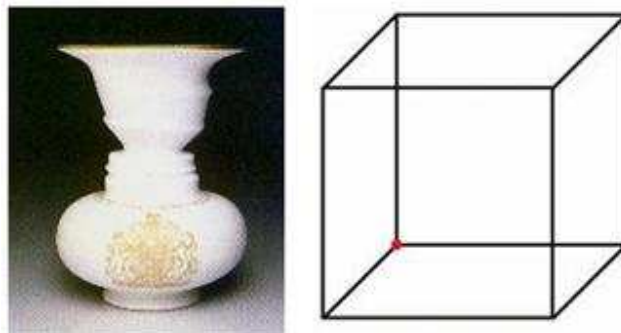
Fuente: J. C. Russ, The Image Processing Handbook.

Una figura puede tener más de una posible interpretación, en otras palabras la figura puede ser ambigua. Múltiples interpretaciones pueden coexistir o una puede dominar a la(s) otra(s). Para todas estas imágenes con múltiples interpretaciones, el plano de fondo produce diferentes percepciones, algunas personas inicialmente ven sólo una o la otra posibilidad, y pueden tener dificultades en el reconocimiento de alguna alternativa. Pero una vez que lo logran, ven las dos interpretaciones, pero es imposible ver ambas a la vez.

Además, la mayoría de las personas pueden alternar entre las dos posibilidades en pocos segundos.

En una escena típica puede haber líneas, bordes, y otras características que en grupo se perciben como un objeto, este objeto esta agrupado con otros para formar un nivel mayor de organización, y así sucesivamente. Violaciones que se producen en esta agrupación jerárquica dan lugar a conflictos que la mente debe resolver. A veces esto se hace viendo sólo una interpretación y haciendo caso omiso de la otra. La Figura B.15 muestra dos ejemplos. Si el objeto brillante se percibe como el primer plano, es visto como un florero con una forma irregular. Si el fondo alrededor del florero se convierte en el primer plano, se observan dos perfiles humanos que se enfrentan. Un ejemplo aún más simple de ello es el dibujo de un cubo. La esquina destacada puede ser vista como el punto más cercano para el espectador o el más alejado.

Figura B.15. Ilusión con dos posibles interpretaciones.

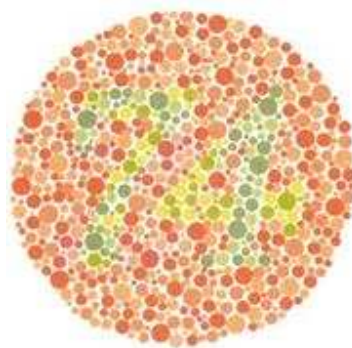


Fuente: J. C. Russ, The Image Processing Handbook.

La agrupación en una imagen de los rasgos que son del mismo color, ubicándolos en el centro, es una prueba común para la ceguera del color. En las pruebas de Ishihara, se dispone un conjunto de círculos de colores de manera que los colores similares se pueden agrupar para reconocer

números (Figura B.16). El ejemplo mostrado es una de un conjunto de pruebas para diagnosticar deficiencia de rojo-verde, la forma más común de ceguera del color, que afecta al menos a uno de cada diez hombres. Esta deficiencia puede ser clasificada como bien protanopia o deuteranopia. En protanopia, el rango visible del espectro es más corto en el rojo comparado con el normal, y parte del espectro que aparece de color azul-verde en el normal aparece como gris en las personas con protanopia. En deuteranopia la parte del espectro que aparece normalmente como verde aparece como gris y la parte púrpura-rojo (el color complementario del verde) también aparecen como gris. En el ejemplo de la Figura B.16, las personas con visión normal del color deben leer el número 74. La deficiencia de color rojo-verde hará que el número se lea como 21. Alguien con ceguera total de color no será capaz de leer ningún número.

Figura B.16. Prueba de Ishihara para la ceguera del color.



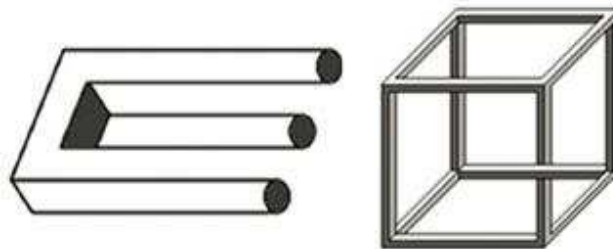
Fuente: J. C. Russ, The Image Processing Handbook.

El camuflaje se utiliza para ocultar los objetos, su objetivo es simplemente desaparecer, romper la imagen de modo que el cerebro no agrupe las partes con gran eficacia y así impedir el reconocimiento.

Se puede destruir la imagen producida por la ilusión de camuflaje, si los objetos (o partes de objetos) se mueven. Si varios segmentos de la imagen se observan avanzar coordinadamente, se agrupan, y la imagen del objeto antes oculto emerge. La visión humana para hacer frente a los intentos de movimiento de características o puntos de cuerpos rígidos, conecta fácilmente pedazos separados que se mueven en forma coordinada.

Se pueden encontrar casos donde una figura, que no es percibida como ambigua ni como una ilusión óptica, sea totalmente imposible de realizar en el sentido de que no es posible construir el objeto 3D percibido en el espacio real 3D. El artista MC Escher creó muchos dibujos, en el que la agrupación era coherente a nivel local, pero no a nivel global, para crear conflictos y rivalidades que hacen el arte muy interesante.

Figura B.17. Tenedor y un cubo imposible.



Fuente: J. C. Russ, The Image Processing Handbook.

Las diferentes ilusiones, ambigüedades e inconsistencias son mucho más que curiosidades. Conducen a cuestionar las imágenes en la retina más de lo que de verdad esta soportado por la geometría y la física de la formación de imágenes. No es como si el sistema visual humano estuviera haciendo deducciones precisas y exactas basadas en la física de la formación de imágenes en el ojo, sino que el sistema de visión se basa en reglas que se

obtienen y están sesgadas por la experiencia previa del individuo y tal vez por la especie. Como resultado los humanos podrían ver lo que no hay y no ver lo que hay.

La mayoría de los humanos sólo ven las cosas que esperan ver, o al menos las que resultan familiares y que han adquirido previamente etiquetas y modelos.

Las Ilusiones ópticas son una característica del sistema visual humano que no son totalmente entendidas. Estos ejemplos pueden proporcionar una idea de cómo las imágenes se procesan en la mente. Pero también dan una advertencia para cualquier persona que se basa en la inspección visual de las imágenes para obtener información sobre el tema.

## **B.5 VISIÓN ARTIFICIAL**

### **B.5.1 Etapas básicas de un sistema de visión artificial**

Como se ha visto, el ser humano captura la luz a través de los ojos y esta información circula a través del nervio óptico hasta el cerebro donde se procesa la imagen y se interpreta para finalmente actuar consecuentemente con la información obtenida. Tratando de imitar este comportamiento, la visión artificial involucra conceptos relacionados con hardware para la captación de las imágenes y software para el procesamiento de las mismas.

Para una aplicación de la visión artificial en la industria alimenticia en donde el fin es detectar grados de calidad o anomalías en los alimentos se podrían encontrar las etapas que se describen a continuación [1]:

**B.5.1.1 Adquisición de la imagen.** En esta etapa se obtiene la imagen adecuada del objeto a estudiar bien sea a través de una cámara de video, una cámara fotográfica, un escáner, etc. La adquisición se hace por medio de algún tipo de sensor el cual modifica su señal eléctrica en función de la intensidad luminosa que percibe. Dentro de las tecnologías más usadas se encuentran los sensores CCD (Charge Coupling Device o Dispositivo de Almacenamiento de Carga) en el cual los elementos fotosensibles y el conjunto de puertas lógicas y circuitos de control asociados son integrados en un mismo chip. La luz que penetra en el semiconductor lleva los electrones de valencia a la banda de conducción, por lo que el número de electrones es proporcional a la intensidad de la luz. Los diodos están formados por fotolitografía, así que tienen un patrón perfectamente regular, sin distorsión de imagen [2].

Un aspecto fundamental para la adecuada captación de las imágenes es el sistema de iluminación. La forma de lograr imágenes en las se resalten los aspectos de interés y se atenúen los que son irrelevantes, con lo que se facilita en gran medida la resolución del problema, es controlando las condiciones de iluminación. Para este fin, se utiliza el sistema de iluminación, que se conforma de una fuente luz dentro de las que se tiene luz fluorescente, halógena, xenón, LED, láser, etc.; y el esquema de iluminación. Algunos ejemplos de esquemas de iluminación son:

- Iluminación posterior (Backlight).
- Iluminación frontal Oblicua y Direccional.
- Iluminación Frontal Axial (Difusa).
- Iluminación de Día Nublado (Cloudy Day Illumination, CDI).
- Iluminación de Campo Oscuro (dark field).
- Array de luces.
- Iluminación de Campo Claro (o brillante).

**B.5.1.2 Preprocesamiento.** En esta etapa, el propósito es mejorar la calidad de la imagen adquirida eliminando las partes indeseables o realzando las partes de mayor interés en ellas. De esta forma se aumentan las posibilidades de éxito del trabajo. Algunas de las técnicas utilizadas con mayor frecuencia son:

- Conversión de los niveles de grises.
- Transformaciones geométricas.
- Transformaciones del histograma.
- Filtrado espacial y frecuencial.

**B.5.1.3 Segmentación.** Es el proceso en el cual se logra descomponer la imagen en sus partes u objetos constituyentes. Es una de las partes más difíciles e importantes en el procesamiento de la imagen dado que una correcta segmentación simplificará en gran medida la solución del problema. Así mismo, una segmentación incorrecta hará que el sistema arroje resultados erróneos. Los diferentes objetos que aparecen en una imagen pueden ser detectados fijándose en aspectos como sus contornos o su textura. Algunas técnicas comúnmente usadas para la segmentación son:

- Umbralización.
- Técnicas basadas en detección de contornos.
- Técnicas basadas en crecimiento de regiones.

**B.5.1.4. Extracción de características.** Una vez se han separado adecuadamente los objetos que componen la imagen se procede a aplicar un método con el cual sea posible extraer los datos de interés. El objetivo entonces es extraer rasgos que proporcionen información cuantitativa o que permitan diferenciar una clase de objetos de otra. Estas características

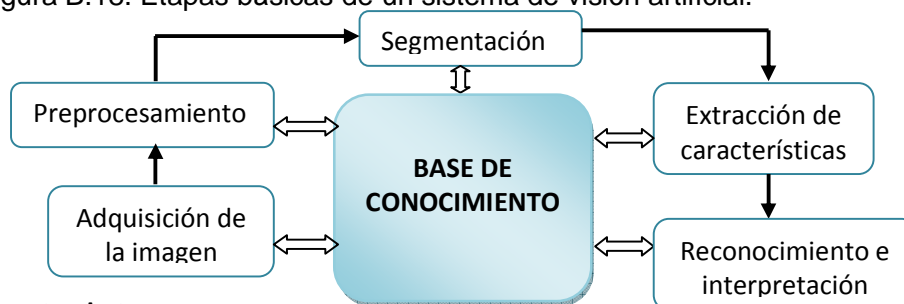
pueden ser de tipo morfológico como área, perímetro, esqueletos, así como características basadas en textura y color.

**B.5.1.5 Reconocimiento e interpretación.** En el proceso de reconocimiento se le asigna una etiqueta de alto nivel a un objeto con base en la información que brindan sus descriptores. La interpretación le da un sentido o significado a los objetos reconocidos para finalmente llegar a clasificarlos en categorías o modelos según sus propiedades. Algunas técnicas comúnmente usadas en la etapa de clasificación son:

- Redes neuronales.
- Sistemas expertos.
- Lógica borrosa.
- Clasificadores estadísticos bayesianos.

Como se describe en González y Woods [1], el conocimiento acerca del dominio del problema se puede codificar formando una base de conocimiento en la cual, por ejemplo, se podrían incluir los principales defectos que es posible encontrar en un problema de inspección, de forma que la base de conocimientos orienta el funcionamiento de cada modulo de procesamiento a la vez que controla la interacción entre ellos, esto se aprecia en la Figura B.18.

Figura B.18. Etapas básicas de un sistema de visión artificial.



Fuente: Autores.

## **B.6 VISIÓN ARTIFICIAL Vs VISIÓN HUMANA**

A pesar de los intentos del hombre por simular el comportamiento de la visión humana, siguen existiendo ciertas cualidades de ésta que aún son muy difíciles de imitar, pues no existe un conocimiento absoluto de los métodos que el cerebro humano emplea para obtener la información de la percepción. Por ejemplo, el sistema visual humano es capaz, de manera inconsciente, de reconocer objetos dispuestos en diferentes posiciones sin importar su ángulo de rotación. También resulta muy eficaz al momento de decidir si un producto es erróneo y proceder a eliminarlo inmediatamente de una línea de producción. Además, la visión humana se adapta a situaciones externas como cambios en la iluminación o el cambio del producto bajo observación. Todos estos procesos resultan difíciles de implementar en un sistema de visión artificial.

Sin embargo la visión humana presenta también muchas limitaciones que son resueltas gracias a la tecnología lo que hace que la visión artificial sea ventajosa en algunas aplicaciones como, por ejemplo, el control de calidad en el sector industrial. La visión artificial hace posible la inspección de productos que son inaccesibles o que se encuentren en ambientes donde factores como el calor, polvo, ruido, etc., imposibilitan la operación de trabajadores humanos. Otra gran ventaja de los sistemas de visión artificial es la objetividad de sus decisiones. La inspección humana está sujeta a los criterios y la percepción de cada individuo lo que la hace subjetiva e inconsistente pues es posible que la evaluación de un objeto varíe entre un observador y otro. Incluso es posible que los criterios de evaluación varíen aún tratándose de un mismo operario dado que el hombre tiene una mala memoria del color, además, en tareas repetitivas donde se requiera observar el mismo tipo de escena una y otra vez, se produce una fatiga visual que

hace que la eficiencia del sistema visual humano se vea considerablemente disminuida provocando una evaluación poco consistente del color.

Por otra parte, los costos laborales de la mano de obra pueden ser altos comparación con los costos de operación del sistema automatizado. Además, el sistema automático permite almacenar fácilmente la información sobre la producción que se puede analizar y ser de utilidad para la toma de decisiones en una empresa.

Todos estos factores hacen justificable la implementación de un sistema de visión artificial que, además, gracias a los avances tecnológicos, se hace cada vez más capaz, rápido y asequible.

## **ANEXO C. CONTROL DE CALIDAD EN EL SECTOR HORTIFRUTÍCOLA**

### **C.1 PROCESOS DE NORMALIZACIÓN**

Dado que en la actualidad cada vez es más evidente la integración de las economías de todo el mundo, principalmente en el sector del comercio, surge la necesidad de establecer procesos normativos que eleven los niveles de competitividad de las diferentes organizaciones dedicadas a este sector. Dichos procesos facilitan el intercambio comercial estableciendo un mecanismo que permite definir las características del producto y así también evaluar su calidad. Es así como nacen los Sistemas de Normalización, los cuales se definen como el procedimiento mediante el cual se elaboran normas de calidad y a la vez, se promueve su aplicación dentro de los diferentes sectores productivos [5].

Una norma es un documento establecido y aprobado por un organismo reconocido, que suministra, para uso común y repetido, reglas, directrices y características para las actividades o sus resultados, encaminados al logro de un grado de orden en un contexto dado [7]. Gracias a las normas, se logra unificar el lenguaje de manera que las partes interesadas en el negocio de intercambio usen términos específicos para definir las características del producto y a la vez cuenten con herramientas objetivas para realizar evaluaciones.

Las normas técnicas deben fundamentarse en los resultados de la investigación científica y tecnológica, además, en la experiencia. Estas normas tienen como fin el beneficio de la comunidad, es por esto que son catalogadas como instrumentos de desarrollo tecnológico, pues brindan herramientas que aportan al mejoramiento de las empresas y, yendo más lejos, pueden contribuir en el desarrollo económico de un país.

Una norma siempre estará vinculada al concepto de calidad el cual tiene numerosas definiciones, dentro de las cuales se encuentra la que presenta la norma ISO 9000, versión 2000: “grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos”. La calidad es una exigencia de los consumidores y es un aspecto esencial para competir en un ambiente que es cada vez más exigente.

### **C.1.1 Elaboración de una norma técnica colombiana**

En Colombia, el organismo encargado del estudio, la elaboración y adopción de las normas técnicas de uso voluntario es el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC. En el caso específico de proceso de normalización de frutas y hortalizas, éste se lleva a cabo por el Comité de Frutas, Hortalizas y tubérculos Frescos.

Una vez se ha estructurado el proyecto de norma por parte del Equipo de Normalización de Frutas y Hortalizas de Cenicafé, el cual debe estar respaldado por los resultados de los estudios de caracterización física y química de la producción nacional, se radica el documento en el ICONTEC para iniciar así la elaboración de la Norma Técnica Colombiana. El proceso de elaboración consta de varias etapas como son [5]:

- Etapa de preconsulta pública. Se convoca a todos los miembros del comité y se presenta el proyecto de norma.
- Etapa de consulta pública. Se distribuye el proyecto de norma aprobado por consenso en el comité y se somete a estudio por parte de los productores, comercializadores, agroindustriales, exportadores,

representantes del gobierno, asociaciones de productores, asistentes técnicos, docentes de universidades y usuarios expertos.

- Etapa de consejo técnico. Un grupo interdisciplinario de profesionales aprobado por el Consejo directivo del ICONTEC analiza el proyecto de norma para su aprobación.
- Ratificación de la norma por parte del Consejo Directivo. Una vez aprobada la norma, ésta se ratifica por el Consejo Directivo.
- Divulgación de la norma. Ya ratificada la norma ésta se distribuye dentro de Información y a las oficinas nacionales del ICONTEC, a la vez que se envía copia a otros organismos de normalización en el exterior con los cuales existen convenios de intercambio de Normas.

## **C.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS PRODUCTOS HORTIFRUTICOLAS Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD**

La calidad final de los productos hortifrutícolas, así como su comportamiento durante la poscosecha y el almacenamiento, está determinada por las características físicas y químicas al momento de la cosecha. Es por esto que es importante estudiar los índices de madurez ya que estos proporcionan información sobre el producto y permiten estimar el momento de la cosecha dependiendo del objetivo comercial requerido.

Para las frutas y hortalizas frescas se incluyen los siguientes atributos de calidad:

- **Apariencia.** Influenciada por el color, el tamaño y la forma.

- **Textura.** Relacionada con aspectos como firmeza, frescura y jugosidad.
- **Sabor.** Incluye factores como el grado de dulzura, acidez, astringencia, amargor, aroma y sabores residuales.
- **Valor nutritivo.** Determinado por el contenido de vitaminas, minerales, fibra, carbohidratos y proteínas.

En el proceso de desarrollo, las frutas y hortalizas pasan por tres principales estados fisiológicos que son crecimiento, maduración y senescencia. De estos estados, son el crecimiento y la maduración los que más interesan dado que en ellos se dan los cambios más significativos que inciden directamente en la calidad del producto.

### **C.2.1 Crecimiento**

Durante el crecimiento, las variaciones de tamaño de los frutos, que determinan el tamaño final de los mismos, se ven influenciadas por factores genéticos, edáficos (tipo de suelo y sus características), ambientales y fisiológicos [8]. La relación entre dimensiones como peso, longitud y diámetro determina el rango de tamaño específico, la forma característica de cada especie (con lo cual es posible diferenciar las variedades), los calibres de cada producto y el comportamiento de la producción.

### **C.2.2 Maduración**

Después del estado de crecimiento ocurre el proceso de maduración el cual es evidenciado por cambios en el color, la composición y la textura, entre otros. Estos cambios son interpretados por el ser humano como señal de

calidad para consumo. De esta forma los consumidores definen, basados en gustos y preferencias, la madurez del producto.

Con el fin de determinar las características internas del fruto se hace necesario utilizar los índices de madurez, que son fundamentales para decidir el momento en que un producto dado puede ser cosechado y asegurar que la calidad del producto es apta para el consumidor. Los índices de madurez son, entonces, características de calidad externa (apariencia), que se relacionan con factores como; el color, la ausencia de defectos y el desarrollo. Debido a esto, los índices de madurez deben incluirse en las normas para frutas frescas puesto que permiten definir los criterios de calidad para los productores. Los índices de madurez comúnmente utilizados son Cambios en el color externo, Consistencia o textura de la pulpa, Contenido de pulpa o jugo, Contenido de azúcar contenido de almidón y Contenido de acidez.

**C.2.2.1. Cambios en el color externo.** En la gran mayoría de frutos se aprecia un cambio en la coloración de su cáscara o piel lo cual revela que se está realizando la maduración interna, es por esto que los cambios en el color externo coinciden con las variaciones en las características internas del fruto. Estos cambios se ven principalmente reflejados en los siguientes aspectos [5]:

- **Contenido de pulpa o jugo.** En la mayoría de los frutos, durante la maduración, aumenta el contenido de pulpa o jugo.
- **Consistencia.** En la maduración, se presenta en los frutos un ablandamiento de los tejidos disminuyendo la dureza de los frutos.

- **Contenido de azúcar.** De manera general, en las frutas ocurre un aumento del contenido de azúcar a medida que avanza la madurez.
- **Contenido de acidez.** Durante la maduración, usualmente el contenido de ácido disminuye, con excepción de algunos frutos.