

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Análisis del Color en Post-cosecha de Chile Habanero basado en Sistemas de Visión por Computadora

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios
para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta

Jesús Raúl Martínez Sandoval

Ensenada, Baja California, septiembre de 2014.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

**Análisis del color en post-cosecha de chile Habanero
basado en sistemas de visión por computadora**

TESIS

Que para obtener el grado de DOCTOR en CIENCIAS presenta:

Jesús Raúl Martínez Sandoval

Aprobada por:



Miguel Enrique Martínez Rosas
Co-Director de tesis



Manuel A. Segovia Quintero
Co-Director de tesis



Francisco José Heredia Mira
Miembro del comité



Manuel Moisés Miranda Velasco
Miembro del comité



Horacio Luis Martínez Reyes
Miembro del comité

Ensenada, Baja California, México Agosto del 2014

Resumen de la tesis de **Jesús Raúl Martínez Sandoval**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México. Septiembre de 2014.

Análisis de Color en Postcosecha de Chile Habanero • basado en Sistemas de Visión por Computadora

Resumen Aprobado por:



Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas
Co-Director de Tesis



Dr. Manuel Alberto Segovia Quintero
Co-Director de Tesis

Resumen.

En la determinación óptima del estado de madurez de frutas, el color es uno de los parámetros más importantes para los consumidores. Recientemente, el uso de la tecnología en el área de agricultura ha sido cada vez más importante en la evaluación de la madurez de los frutos, a través del empleo de sistemas de visión por computadora, los cuales obtienen y procesan información sin la necesidad de interactuar físicamente con los frutos, reduciendo considerablemente el margen de error.

En este trabajo se presenta una investigación sobre el color del chile Habanero para evaluar la evolución de maduración en post-cosecha utilizando un sistema de visión por computadora en conjunto con algoritmos para el procesamiento digital de las imágenes capturadas. El método utilizado, además de ser no-invasivo es de interés comercial, ya que a partir de los resultados obtenidos se puede introducir el fruto al mercado en el momento en que ofrezca las mejores características para el consumidor con apoyo en etapas de automatización en el manejo de frutos, lo que a su vez permite mejorar la competitividad. Los algoritmos de procesamiento y la metodología utilizada para llevar a cabo este trabajo ofrecen una plataforma de desarrollo para posibles aplicaciones en el control de calidad del chile Habanero. Para este trabajo, se segmentaron las imágenes en el espacio de color RGB y posteriormente se utilizó el espacio de color CIELAB para extraer la información de los parámetros de color (L^* , a^* , b^* , C_{ab}^* y h_{ab}).

Palabras Clave: *Maduración de chile Habanero, sistemas de visión, color, espacio CIELAB*

Dedicatoria

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional.

A mi hermano, por creer en mi y apoyarme siempre.

A mi Familiares y amigos, por estar al pendiente y dar seguimiento a mi formación.

A mi tío Alejandro Martínez Sánchez (QEPD).

A mi padrino Pedro Bio (QEPD).

A mi sinodal José Ignacio Ascencio López (QEPD).

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado y a la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño (FIAD) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), en conjunto con el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en su Departamento de Acuicultura por las facilidades otorgadas para la realización de éste trabajo.

Al Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas, por su amistad y respaldo como mi Co-Director de tesis. Que sin importar las dificultades y obstáculos que se presentaron durante este proyecto de investigación, siempre estuvo ahí para ayudarme y buscar en conjunto la mejor solución.

Al Dr. Manuel A. Segovia Quintero, por su aprecio y respaldo como mi Co-Director de tesis. Por proporcionarme todas las facilidades para realizar éste trabajo en colaboración con su grupo de investigación y las instalaciones de su laboratorio.

A mi comité Dr. Francisco José Heredia Mira, Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco, Dr. Horacio Luis Martínez Reyes, por sus enseñanzas y consejos.

A mis amigos y colegas de la Universidad de Sevilla, por brindarme la dicha de conocerlos y compartir tantas experiencias inolvidables juntos. También, por ayudarme a crecer personal y profesionalmente durante mi estancia en esa hermosa ciudad de Sevilla. Especialmente al Dr. Francisco Heredia por aceptarme y abrirme las puertas en su grupo de investigación, además, por brindarme todo su apoyo y amistad.

A mis compañeros de posgrado, por su amistad y la convivencia durante nuestra formación profesional.

A todos aquellos que de alguna u otra manera colaboraron para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Pregunta de investigación	3
1.3. Propuesta	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Importancia del estudio	4
1.6. Descripción del contenido	4
2. Marco Teórico	6
2.1. Colorimetría	6
2.1.1. Funcionamiento del sistema visual humano	7
2.1.2. Colorimetría Triestímulo	11
2.1.3. Espacios de color	12
2.1.4. Esquema de visión digital del color	15
2.2. Sistemas de visión por computadora	16
2.2.1. Representación de imágenes digitales	17
2.2.2. Procesamiento digital de imágenes a color	21
2.2.3. Procesamiento digital de imágenes hiperespectrales NIRS	22
2.3. Chile Habanero (<i>Capsicum chinense Jacq.</i>)	25
2.3.1. Variedad Jaguar	26
2.3.2. Variedad Mayan K'iin	28
3. Desarrollo del Trabajo de Investigación	29
3.1. Introducción	29
3.2. Montajes utilizados	29
3.2.1. Cámara en posición vertical desplazable y muestras fijas	30
3.2.2. Cámara en posición vertical fija y muestras fijas	31
3.2.3. Diseño e implementación de red inalámbrica de sensores para el monitoreo de variables ambientales	32
3.3. Diseño e implementación de algoritmos y funciones para procesamiento digital de imágenes	39

3.3.1.	Algoritmo de adquisición automática de imágenes digitales . . .	40
3.3.2.	Algoritmo de segmentación por área para la generación de las sub-imágenes	40
3.3.3.	Algoritmo de segmentación del chile Habanero	42
3.3.4.	Algoritmo para la extracción y cálculo de parámetros de color .	43
3.3.5.	Algoritmo para el acceso y procesamiento de las imágenes de la base de datos	44
3.3.6.	Algoritmo para la generación de la matriz de color	46
3.4.	Colaboración científica con la Universidad de Sevilla	50
3.4.1.	Proyecto: Uvas de la Rioja	50
3.4.2.	Proyecto: Colorímetro	54
4.	Pruebas y Resultados	57
4.1.	Introducción	57
4.2.	Experimento 1: chile Habanero de la variedad Jaguar, mayo 2012 . . .	58
4.2.1.	Metodología del experimento 1	58
4.2.2.	Resultados: evolución de color de la variedad Jaguar	61
4.3.	Experimento 2: chile Habanero de la variedad Mayan K'iin, junio 2013	65
4.3.1.	Metodología del experimento 2	66
4.3.2.	Resultados: evolución de color de la variedad Mayan K'iin . . .	68
4.4.	Experimento 3: chile Habanero de la variedad Mayan K'iin, agosto 2013	70
4.4.1.	Metodología del experimento 3	71
4.4.2.	Resultados: evolución de color de la variedad Mayan K'iin . . .	72
4.5.	Experimento 4: Uvas de la Rioja, mayo 2013	75
4.5.1.	Metodología del experimento 4	77
4.5.2.	Resultados: análisis de imágenes en el espectro visible	78
4.5.3.	Resultados: análisis de imágenes hiperespectrales NIRS y anto- cianos	78
4.6.	Implementación 1: red inalámbrica de sensores	81
4.6.1.	Módulos para el nodo esclavo	81
4.7.	Implementación 2: Colorímetro electrónico con sensor RGB	84
4.7.1.	Sistema colorímetro	84
5.	Conclusiones	87
5.1.	Trabajo a futuro	89

Índice de figuras

2.1. Curvas de sensibilidad espectral de los tres tipos de conos que conforman la visión fotópica.	7
2.2. Elementos que conforman el sistema visual humano.	8
2.3. Diagrama de cromaticidad CIE 1931 para el observador de 2°.	9
2.4. Espectro del iluminante D65.	10
2.5. Funciones de ajuste de color del observador estándar CIE 10° [1], [2].	10
2.6. Funciones de ajuste de color del ojo humano para el observador estándar CIE 2° [3], [1], [2].	11
2.7. Espacio de color RGB.	13
2.8. Espacio de color CIELAB.	14
2.9. Esquema de visión digital del color.	15
2.10. Diagrama a bloques del proceso de visión por computadora.	16
2.11. Diagrama a bloques del SVC.	17
2.12. Convención de ejes utilizada para la representación de imágenes digitales.	18
2.13. Imagen a color en el espacio RGB.	22
2.14. Despliegue de datos hiperespectrales (hipercubo) para facilitar el análisis multivariable.	24
2.15. Modos de captura NIR.	25
2.16. Fenómeno de absorción, transmisión y reflexión de la radiación electromagnética al interactuar con la materia.	25
3.1. Montaje con cámara vertical desplazable y muestras fijas.	31
3.2. Elementos internos del sistema de visión por computadora.	33
3.3. Diagrama esquemático de la conexión del módulo sensores.	34
3.4. Diagrama esquemático de la conexión del módulo adquisición.	35
3.5. Diagrama esquemático de la conexión del módulo LCD.	36
3.6. Diagrama esquemático de la conexión del módulo fuente de poder.	36
3.7. Diagrama de flujo del software embebido que contiene el microcontrolador del sistema de instrumentación.	38
3.8. Topología de comunicaciones entre los nodos esclavo, el nodo maestro y servidor web.	39
3.9. Diagrama de flujo del algoritmo para la adquisición automática de imágenes digitales.	41

3.10. Diagrama de flujo del algoritmo para la generación de las sub-imágenes.	42
3.11. Diagrama de flujo del algoritmo para segmentación de chile Habanero. .	44
3.12. Diagrama de flujo del algoritmo para extracción y cálculo de parámetros de color.	45
3.13. Diagrama de flujo del algoritmo para el acceso y procesamiento de las imágenes de la base de datos	47
3.14. Diagrama de flujo del algoritmo para la generación de la matriz con los parámetros de color.	48
3.15. Diagrama de color a^*-b^* descriptivo de la información generada a partir de la matriz de color.	49
3.16. Metodología utilizada para realizar proyecto uvas de la Rioja.	51
3.17. Sistema de adquisición de imágenes DigiEye.	52
3.18. Diagrama de sistema de adquisición de imágenes hiperespectrales en cercano a infrarrojo [4].	53
3.19. Sensor RGB TCS3200.	55
3.20. Diagrama de flujo del algoritmo del sistema colorímetro.	56
4.1. Ejemplar 1 en color verde (a) en fase inmadura en su día uno y del mismo ejemplar en color naranja (b) en fase madura en su día quince.	59
4.2. Pantalla de la interfaz gráfica de usuario para el procesamiento de imágenes.	60
4.3. Pantalla de la interfaz gráfica de usuario para el procesamiento de evolución de color por ejemplar.	61
4.4. Diagrama de color a^*-b^* del chile Habanero de la variedad Jaguar. . . .	62
4.5. Gráfica de la componente L^* promedio con respecto al tiempo del experimento 1.	63
4.6. Diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio por grupo de madurez.	64
4.7. Gráfica del croma C_{ab}^* promedio con respecto al tiempo del experimento 1.	64
4.8. Gráfica del ángulo de tono h_{ab} promedio con respecto al tiempo del experimento 1.	65
4.9. Imagen de la primera hora de muestreo de los 49 ejemplares del experimento junio 2013.	67
4.10. Imagen de la última hora de muestreo de los 49 ejemplares del experimento junio 2013.	67
4.11. Diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color de la variedad Mayan K'iin.	69
4.12. Gráfica de la componente L^* promedio del experimento 2.	69
4.13. Diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio del experimento 2.	70
4.14. Gráfica del croma C_{ab}^* con respecto al tiempo del experimento 2.	71
4.15. Gráfica del ángulo de tono h_{ab} con respecto al tiempo del experimento 2.	72
4.16. Imagen de la primera hora de muestreo del día 1 del experimento 3. . .	73
4.17. Imagen de la última hora de muestreo del día 8 del experimento 3. . . .	73

4.18. Diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color del experimento 3. . .	74
4.19. Gráfica de la componente L^* promedio con respecto al tiempo del experimento 3.	75
4.20. Diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio del experimento 3.	76
4.21. Gráfica del croma C_{ab}^* con respecto al tiempo del experimento 3.	76
4.22. Gráfica del ángulo de tono h_{ab} con respecto al tiempo del experimento 3.	77
4.23. Muestra GAP_{D1} , (a) imagen a color de la muestra y (b) imagen segmentada.	78
4.24. Diagrama de color a^*-b^* de las uvas del experimento 4.	79
4.25. Muestra GAP_{D1} a 982 nm, (a) Imagen en NIRS y (b) Imagen segmentada.	79
4.26. Resultados gráficos de las muestras de uvas en el plano definido por PC1 y PC2. (a) Las diferentes etapas de madurez, o (b) las diferentes variedades.	81
4.27. Espectro promedio y SNV-Detrend de las muestras en NIR en la región de los 950 a 1650 nm.	81
4.28. Comparación del valor de referencia del HPLC con los valores pronosticados por los modelos de imágenes hiperespectrales. (a) antocianos totales y (b) antocianos no acicaladas.	82
4.29. Módulo del sistema mínimo utilizado para la red de sensores.	83
4.30. (1) Módulo de los sensores y (1) el sensor de humedad relativa	83
4.31. Módulo LCD.	84
4.32. (1) Elementos del nodo esclavo y (2) sistema operando.	85
4.33. Elementos del colorímetro.	86
4.34. Estándar de colores para la calibración del colorímetro.	86

Índice de tablas

2.1. Características de la planta de la variedad Jaguar de chile Habanero. . .	27
4.1. Descriptores estadísticos de calibración para los modelos desarrollados en la zona NIR cercana a 950-1650 nm.	80

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El sentido de la visión es uno de los más importantes para muchos de los organismos a nuestro alrededor. Para el ser humano se ha estimado que aproximadamente el 70 % de la información percibida proviene de su sistema de visión. El ser humano cuenta con capacidades extraordinarias para analizar las imágenes de las escenas que observa en su entorno [5].

Tratar de dotar a una máquina con la capacidad de lograr procesar imágenes como lo hace el ser humano ha sido, desde hace varias décadas, uno de los principales retos para la comunidad científica que trabaja en visión artificial o visión por computadora [5]. De forma general, la visión por computadora, puede ser definida como la capacidad que una máquina debería tener para tratar y analizar imágenes, con el objeto de que dicha máquina pueda desarrollar de forma automática una tarea dada, [6].

El procesamiento digital de imágenes (PDI) es una de las etapas primarias en un sistema de visión por computadora (SVC). De forma sencilla, el PDI puede definirse como un conjunto de procedimientos que se realizan sobre una imagen para su tratamiento, almacenamiento o transmisión [5], [7], [8]. Esta técnica es una de las ramas del tratamiento digital de señales que más desarrollo ha experimentado en las últimas cuatro décadas. Esto se debe fundamentalmente a dos factores: primero, al avance vertiginoso que ha tenido el hardware, en particular, en los procesadores especializados, en los arreglos de procesadores y en las computadoras; y segundo, a la importancia que esta técnica ha adquirido en la vida moderna. Varios autores han determinado incluir como parte del concepto de análisis de imágenes al procesamiento digital de imágenes, tomando en cuenta en este caso al llamado análisis y la interpretación de imágenes [5], [9], [10], [11], [12]. El análisis de imágenes por computadora es un procedimiento que tiene como objetivo procesar, identificar e interpretar de forma automática o de forma semiautomática los aspectos mas relevantes presentes en una imagen que ha sido previamente digitalizada. El análisis de imágenes se puede definir como una disciplina que trata con el estudio de las teorías, técnicas y herramientas relacionadas con el análisis de datos sensoriales obtenidos en un cierto contexto, la generación de descripciones

simbólicas de esos datos con el fin de emitir conclusiones o diagnósticos que pueden ser de utilidad según criterios establecidos [5]. Cabe mencionar, que cuando se pretende sustituir el sistema visual humano por un SVC se tiene que hablar de receptores ópticos que serán los ojos del sistema. Aunque la acción de ver parece sencillo por la eficiencia y rapidez con que lo realiza el sistema visual humano, esto resulta en un proceso complejo para los sistemas de visión por computadora. Sin embargo, en la actualidad se han logrado grandes avances tanto teóricos como prácticos (en sistemas de análisis de imágenes) de diversa índole que se aplican a tareas complejas que van desde la orientación de misiles, la detección y reconocimiento de fotografías aéreas, análisis e interpretación de imágenes biomédicas, clasificación de frutos, análisis de la calidad de alimentos, entre muchas otras [13], [14], [15], [16], [17], [18].

En la aplicación de visión por computadora en la industria alimentaria, los elementos clave son el sentido visual o descriptores de los productos alimenticios en las imágenes, los cuales son conocidos como las características de la imagen, que son extraídos de las mismas y, además, son indicadores de la calidad de los alimentos [19], [20], [20], [21]. Las imágenes de los productos alimenticios capturados en una computadora se almacenan, procesan y se muestran en forma de matrices (los elementos de la matriz se les denomina píxeles para fines de procesamiento de imagen) en el que la información almacenada se puede extraer como características de la imagen [22], [23], [17], [24], [25]. De acuerdo con la diversa información almacenada en los píxeles, las características extraídas de la imagen se pueden clasificar en cuatro tipos: color, tamaño, forma y textura. El color es la intensidad de los píxeles, el tamaño refleja el número de píxeles y la forma describe los límites de los productos alimenticios [26], [27], [28], [29]. La textura es normalmente la dependencia entre los píxeles y sus píxeles vecinos o la variación de la intensidad de los píxeles [5], [30], [31].

Las características de color se pueden extraer en diferentes espacios de color como el RGB (rojo, verde y azul, por sus siglas en inglés) y CIELAB (L^* , a^* y b^*) utilizando medios estadísticos [19], [32], [28]. Las características de tamaño se obtienen, por lo general, con mediciones del área, perímetro, longitud y ancho. La forma se caracteriza, principalmente, de dos maneras, las mediciones de tamaño dependientes, como compacidad (cualidad de compacto [33]) y elongación, y mediciones independientes del tamaño como el momento espacial y el descriptor de Fourier [34]. En el análisis de la textura, cuatro métodos diferentes están disponibles hasta el momento, los cuales son: la textura estadística, la textura estructural, textura basada en transformadas, y la textura basada en modelos.

Estas características de la imagen se han aplicado con éxito en varias ocasiones y en diversos tipos de alimentos, tales como frutas [35], [36], [17], [37], verduras [38], [39], quesos [40], [41], [42], carnes [43], [44], [45] y pescados [46], [47] para la detección y segmentación de los defectos de la superficie [48], [49], [50], la predicción y la caracterización de las propiedades físicas y químicas [51], [52], la evaluación y la determinación de las características sensoriales [53], [54]. En conjunto con estas aplicaciones, también se han desarrollado diversos métodos para la extracción de estas características durante las últimas décadas [19]. Actualmente, también se utilizan técnicas de imágenes hiper-

espectrales en el cercano infrarrojo (NIR) para evaluar la calidad de alimentos, defectos y daños internos. Esta técnica, proporciona información espectral relacionada a cada pixel en las imágenes, formando un hipercubo de datos, los cuales, se pueden relacionar a compuestos químicos presentes en el producto [4], [55], [56], [57], [58], [35], [59], [60], [61] [62], [63], [64], [65], [66], [67].

La tecnificación de los cultivos agrícolas ha mejorado para aumentar la productividad, asegurar la inocuidad, aprovechar y maximizar uso del agua en lo que se conoce como agricultura protegida. Dentro de estas técnicas, se encuentra la **acuaponia**, la cual, es una combinación de la **acuicultura** (cultivo de peces) e **hidroponía** (el cultivo de plantas sin suelo), y se refiere a la integración de la producción de plantas/vegetales hidropónicos con la acuicultura [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74].

1.2. Pregunta de investigación

¿Se podrá medir y analizar la evolución del color en post-cosecha de chiles Habaneros cultivados en condiciones acuapónicas por medio de un sistema de visión por computadora y procesamiento digital de imágenes?

1.3. Propuesta

Diseñar e implementar un sistema de adquisición de imágenes digitales para el chile Habanero y los algoritmos necesarios para el procesamiento y análisis de las imágenes. Las cuales, por medio de sistema de adquisición, los algoritmos de procesamiento y la colorimetría triestímulo permitirán obtener una medida objetiva del color y de su evolución en post-cosecha.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Medir la evolución del color en post-cosecha del chile Habanero (*Capsicum chinense Jacq.*), cultivado en condiciones acuapónicas, basado en un sistema de visión por computadora y algoritmos para el procesamiento y análisis digital de imágenes.

1.4.2. Objetivos específicos

Con el fin de alcanzar el objetivo general, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar e implementar un sistema de adquisición de imágenes digitales.

- Diseñar y desarrollar algoritmos de procesamiento digital de imágenes para chile Habanero.
- Realizar experimentos para la adquisición de imágenes digitales de chile Habanero en post-cosecha.
- Evaluar los algoritmos de procesamiento digital de imágenes con la base de datos de imágenes generada en la etapa de experimentación.
- Analizar la información de color de la base de datos de imágenes generada en la etapa de experimentación.

1.5. Importancia del estudio

El presente trabajo contribuirá en la investigación sobre el color del chile Habanero, su evolución en post-cosecha y la utilización de sistemas de visión y el procesamiento digital de imágenes para este fin. Con éste sistema, además, se brindará apoyo en el desarrollo de futuras investigaciones, dentro del Departamento de Acuicultura de CICE-SE y del desarrollo de nuevos instrumentos en el Cuerpo Académico de Comunicaciones e Instrumentación Electrónica (CACIE) de la UABC.

Cabe resaltar, que los resultados de este trabajo serán de importancia para el sector agrícola relacionado con este fruto, debido a que se presentan los datos con la información de color medida progresivamente durante su etapa de post-cosecha a partir de imágenes digitales. Lo cual, al ser un método no invasivo para adquirir estos datos, lo convierte en un factor de interés para el sector, ya que al utilizar este tipo de tecnología se puede llegar a automatizar el proceso e incrementar la velocidad de manejo y, por lo tanto, mejorar la competitividad al introducir el producto al mercado cuando tenga las mejores características para el consumidor.

Los algoritmos de procesamiento y la metodología utilizada para llevar a cabo este trabajo, son una herramienta base y pone la pauta para el desarrollo de software y posibles aplicaciones en el control de calidad del chile Habanero.

1.6. Descripción del contenido

Este trabajo de investigación se enfoca en los atributos del color del chile Habanero cultivado en condiciones acuapónicas, utilizando un sistema de visión por computadora y procesamiento digital de imágenes para medir su evolución de color en post-cosecha y se encuentra dividido en los siguientes capítulos:

Capítulo 1. En éste capítulo se da una breve introducción, se presentan los antecedentes, se comenta como surge la idea de este proyecto, se muestra el planteamiento del problema y la propuesta que dará solución a este; además, se plantean el objetivo general, los objetivos específicos y la importancia del estudio descrito en este trabajo.

Capítulo 2. En el capítulo 2 se presenta la introducción a la colorimetría, el funcionamiento del sistema visual humano, la colorimetría triestímulo, los modelos de color y el esquema de visión digital del color; además, se describen los sistemas de visión por computadora, la representación de imágenes digitales, el procesamiento digital de imágenes a color, el procesamiento de imágenes hiperespectrales NIRS; y posteriormente, se describe la información relacionada con los chiles Habaneros. También se incluye la teoría relacionada con la aplicación de las técnicas de procesamiento de imágenes al análisis de color del chile Habanero. Finalmente, se describe la revisión del estado del arte sobre la aplicación del procesamiento de imágenes en productos agrícolas en post-cosecha.

Capítulo 3. En el capítulo 3 se describen los diferentes montajes utilizados en el sistema de visión por computadora, la implementación de los algoritmos dedicados al procesamiento de las imágenes y el análisis de color en post-cosecha de chile Habanero. También, se describen los proyectos llevados a cabo durante la colaboración con el Grupo de Color y Calidad de Alimentos de la Universidad de Sevilla.

Capítulo 4. En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas a lo largo del desarrollo de éste trabajo. Se muestran las gráficas que representan los resultados del comportamiento de la evolución del color en post-cosecha de chiles Habaneros basado en el análisis de imágenes digitales. También, se presentan los resultados del proyecto uvas de la Rioja. Por otro lado, se describen las implementaciones desarrolladas para los módulos de la red inalámbrica de sensores, además de la implementación de un colorímetro.

Capítulo 5. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones de este trabajo.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Colorimetría

La colorimetría, tal como se conoce actualmente, tiene pocos años de existencia, aunque los primeros intentos por medir y comprender los conceptos relativos al color se remontan a Aristóteles (384-322 a. C.).

Años más tarde aparecerían otros autores que también trataron el tema como Newton con su obra ‘Optica’ (1704), Dalton (1794), Grassmann (1853), Maxwell (1860), Rayleigh (1882), Koning (1897) ... hasta llegar a 1913 a la creación de la Comisión Internacional de Iluminación CIE (por sus siglas francesas de Commission Internationale de l’Eclairage), y más concretamente la reunión en Cambridge de 1931 en el que el comité técnico del CIE en “Visión y Color” definió unos patrones para la especificación numérica del color [75].

El **color** es la respuesta mental al estímulo que una radiación visible produce en la retina, y que se transmite al cerebro por el nervio óptico. El color es considerado un concepto psicofísico, relacionado a la vez con la psicología del observador, la fisiología de la visión y la energía radiante espectral de la fuente de luz [76], [77], [78].

La **colorimetría triestímulo** es la ciencia que estudia el color y describe de forma numérica los aspectos psicofísicos atribuidos al color y que están dentro de nuestros límites de percepción visual [76],[67], [79]. El objetivo de la colorimetría es incorporar las propiedades del sistema visual humano en la cuantificación objetiva de los estímulos luminosos visibles. Como el color percibido es una propiedad del ojo humano y el cerebro, y no una propiedad física, la colorimetría esta inevitablemente ligada a la biología de la visión.

El color y la percepción del color están limitados a la primera etapa de la visión por la propiedades espectrales de una capa sensitiva a luz con fotorreceptores que cubren la parte posterior del ojo. Estos fotorreceptores transducen los fotones que van llegando para producir los patrones eléctricos que eventualmente conducen a la percepción. Durante el día la visión del color (fotópica) depende principalmente de las tres clases de conos fotorreceptores, cada uno con diferente sensibilidad espectral según a la parte del espectro visible a la que son más sensibles. La visión nocturna (escotópica), por el

contrario, depende de una sola clase de fotorreceptores, los bastones [80].

2.1.1. Funcionamiento del sistema visual humano

Los colores que el ser humano percibe de un objeto están determinados por la naturaleza de la luz reflejada del objeto. El color del objeto no sólo depende del objeto en sí, sino de la fuente de luz que lo ilumina, del color del área que le rodea y del sistema visual humano (el mecanismo ojo-cerebro) [81], [80].

En el ojo humano, la retina actúa como un transductor (dispositivo que transforma el efecto de una causa física, en este caso luz, en otro tipo de señal, normalmente eléctrica [82]) entre la luz que entra al ojo y los procesos de la luz y la percepción del color que tiene lugar en la corteza visual del cerebro. Los elementos detectores de luz en la retina son morfológicamente distintos (120 millones de bastones y 7 millones de conos).

Existen tres tipos de conos, teniendo cada uno una distribución característica de longitudes de onda sobre la que responde según la radiación entrante. Los conos operan en condiciones de visión fotópica a niveles altos de iluminación, los bastones funcionan en visión escotópica a niveles bajos de iluminación. La sensibilidad espectral de cada tipo de cono se muestra en la figura 2.1. Estas curvas se obtienen usando experimentos de igualación de color, pero las sensibilidades espectrales pueden ser confirmadas por observaciones directas en los conos individuales utilizando un microspectrofotómetro. Los tres tipos de conos tienen sensibilidades máximas en las partes azul, verde y rojo del espectro y son llamados receptores azul (β), verde (γ) y rojo (ρ), respectivamente. La luz de diferentes longitudes de onda que inciden sobre la retina inducen respuestas en los conos β , γ , y ρ de magnitudes dictadas por las sensibilidades espectrales. Las diferentes sensibilidades a una longitud de onda son la base de la visión a color [3].

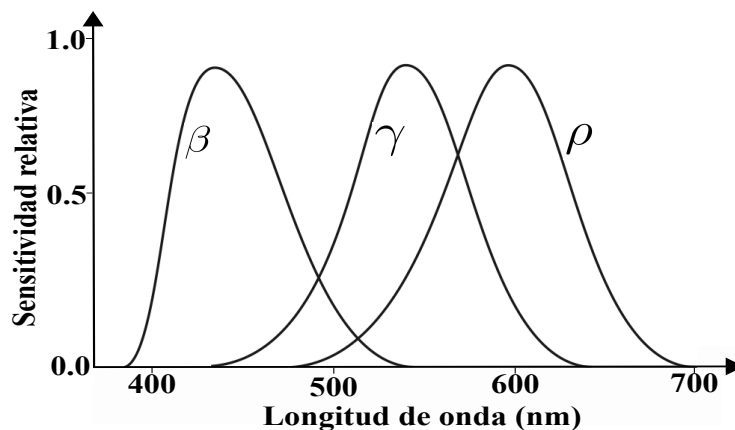


Figura 2.1: Curvas de sensibilidad espectral de los tres tipos de conos que conforman la visión fotópica.

Se requiere la interacción de tres factores para realizar la medición de la apariencia de color de cualquier objeto en una escena. Estos son: la comprensión del sistema visual humano, el efecto de la luz sobre los objetos en su entorno y la naturaleza de los materiales observados. La sensación de color es un fenómeno psicofísico, que es sólo una parte de la percepción visual global de la información detectada por el ojo e interpretada por el cerebro. La compleja respuesta visual se puede considerar como la suma de las respuestas reconocidas en el cerebro a partir de las señales detectadas por el ojo de la escena vista. La sensación, por lo tanto, se percibe como si se proyectara hacia el mundo en la que se originó. Esto nos lleva al error de imputar a la escena las sensaciones que generó. Las sensaciones existen en la mente del observador y no en el mundo exterior que las produce.

Los ojos humanos tienen un campo circular cercano de visión y esta compuesto de tres membranas (figura 2.2). La membrana exterior, la esclerótica, es continua posteriormente con la cubierta del nervio óptico y anterior con la córnea. El iris y el cuerpo ciliar, que suspende la lente, surgen en la capa intermedia, la coroides, contiene la red capilar. La membrana de detección de luz interior, la retina, recubre el interior de la parte posterior del ojo. El primer paso en el proceso visual es el control automático de la cantidad de luz que entra en el ojo a través del iris. El flujo se centra por la lente a la fovea en la región central de la retina donde se detecta como color. La señal se amplifica [83] y luego es transmitida a través de la vía visual [84] para la interpretación en áreas específicas de la corteza visual del cerebro [85], [86]. La retina tiene dos tipos de receptores que detectan la luz, los conos y bastones, que se llaman así debido a la forma de sus estructuras, tal como se ve por el microscopio. Los conos detectores de color, visión fotópica, son sensibles a tres longitudes de onda en personas con una visión normal de color y están densamente colocados en un patrón de mosaico en el centro de la fovea. Estos ocupan menos de 2° del campo visual y es la base de la CIE 1931 2° observador referencia colorimétrica [75].

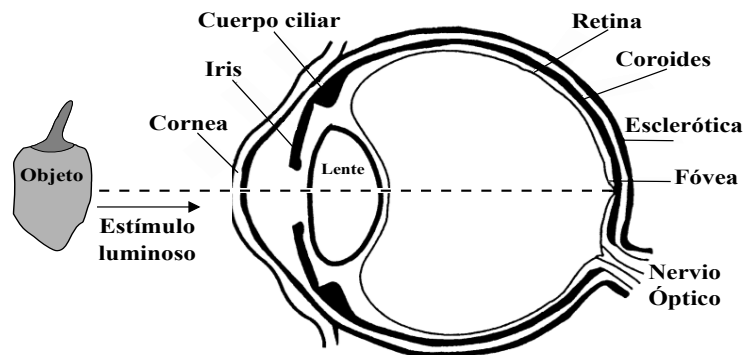


Figura 2.2: Elementos que conforman el sistema visual humano.

El sistema CIE de medición de color [1], [87] transforma la reflexión o transmisión de espectro del objeto en el espacio de color en tres dimensiones utilizando la distribución espectral de potencia de la fuente luminosa y las funciones de igualación de color de los observadores estándar [87]. Los procedimientos matemáticos se dan en cualquier texto estándar en el color [88], [89], [2] y [90]. El sistema se basa en el principio tricromático pero, en lugar de utilizar las primarias rojo, verde y azul “reales” con su requerimiento de ajuste negativo, utiliza “imaginarias” positivas X, Y y Z. La primaria Y, conocida como reflectancia luminosa o transmitancia, contiene todo el estímulo luminoso. Cada color puede ser ubicado de forma única en el espacio de color CIE 1931 (figura 2.3) por Y y sus coordenadas de color $x = \frac{X}{X+Y+Z}$ y $y = \frac{Y}{X+Y+Z}$, proporcionado el iluminante y definiendo el observador.

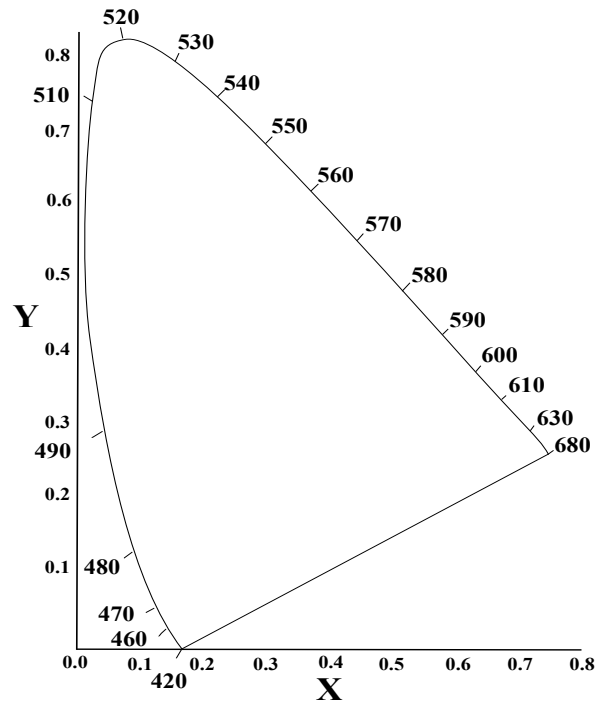


Figura 2.3: Diagrama de cromaticidad CIE 1931 para el observador de 2°.

El iluminante original que representa la luz de día fue definido por la CIE como iluminante C, pero hoy en día es sustituido por el D65 (figura 2.4), ya que es un iluminante que incluye la componente de ultravioleta y tiene una temperatura de color de 6500°K. Las temperaturas de color de lámparas y la luz de día oscilan, aproximadamente, de 3000°K para lámparas de filamento de tungsteno, 4000°K para lámparas fluorescentes de un blanco cálido a 5500°K para la luz del sol y 6500°K para la luz del día nublado promedio, aproximadamente 20000°K de cielo azul totalmente sin sol. Debido a que las funciones de ajuste de color del observador original de 2° solo aplicaba estrictamente

para objetos pequeños, i.e., el equivalente a un diámetro circular de 15 mm visto a una distancia de 45 cm, la CIE a agregado el observador de 10° , que se puede apreciar en la figura 2.5, donde el objeto se incremento a un diámetro 75 mm. Actualmente, la tendencia en la medición del color es utilizar D65 y el observador 10° a excepción de objetos muy pequeños [1], [2].

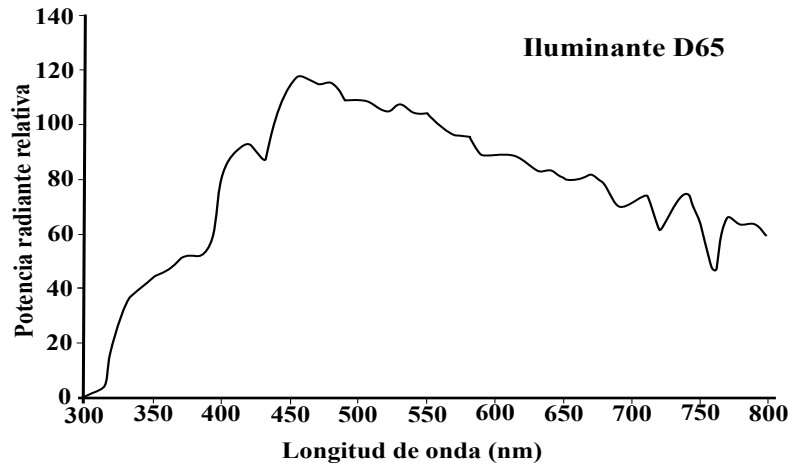


Figura 2.4: Espectro del iluminante D65.

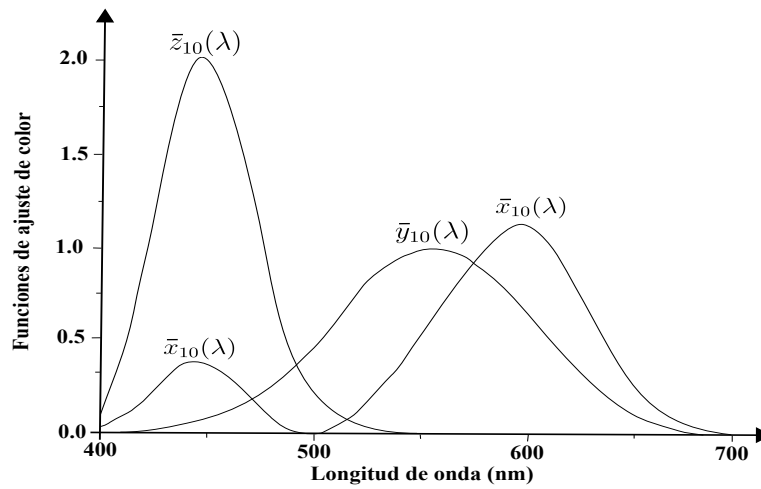


Figura 2.5: Funciones de ajuste de color del observador estándar CIE 10° [1], [2].

2.1.2. Colorimetría Triestímulo

La visión humana normal es tricromática. Ya que un observador puede coincidir con una luz de prueba de cualquier composición espectral visible a partir de una mezcla adecuadamente ajustada de sólo otras tres luces (R, G, B). En consecuencia, los colores pueden ser definidos por tres variables: las intensidades de las tres luces primarias con las que coinciden, los cuales, son los valores triestímulo.

La base científica para la medición del color es la existencia de tres tipos diferentes de señales de respuesta del ojo humano, sin embargo se han identificado cuatro tipos diferentes de receptores: conos (β , γ , ρ) y bastones, los mensajes de estos se codifican (en una forma que aún no se entiende completamente) para dar tres tipos de señal.

En la obra histórica llevada a cabo a finales de 1920 y los inicios de 1930 por Wright [91] y Guild [92], se establecieron las características de respuesta del funcionamiento de un ojo humano estándar (el observador estándar) a las diferentes fuentes de luz de colores del espectro. Este trabajo formó la base de la Comisión Internationale de l'Eclairage [75]. Con el fin de ser capaz de relacionar los resultados obtenidos a partir de diferentes combinaciones de estímulos de color primario, se utilizaron ecuaciones de transformación lineal para convertir las curvas de Wright y Guild a funciones más útiles. Esto dio lugar a la definición de tres primarios integrales, X, Y y Z (ver figura 2.6). Estos primarios no existen como luces reales, sino que abarcan todos los colores y son, por lo tanto, una herramienta matemática muy útil.

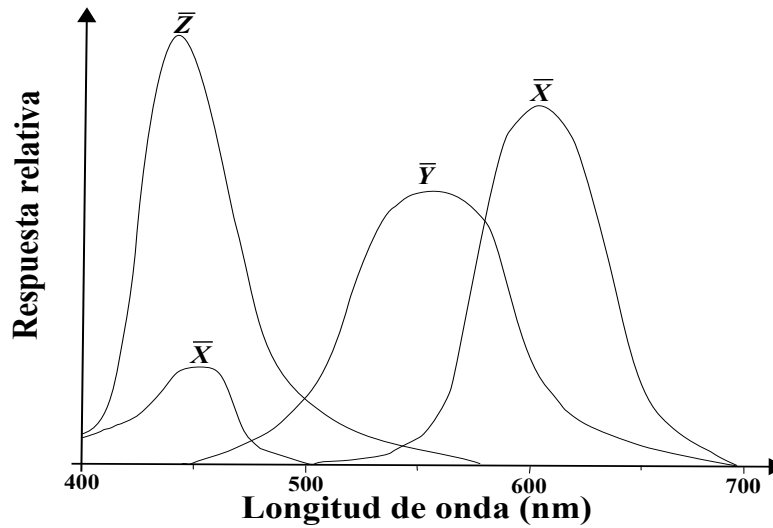


Figura 2.6: Funciones de ajuste de color del ojo humano para el observador estándar CIE 2° [3], [1], [2].

2.1.3. Espacios de color

El propósito de un espacio de color es facilitar la especificación de los colores de alguna forma estándar. En esencia, un espacio de color es una especificación de un sistema de coordenadas 3-D y un subespacio dentro de dicho sistema donde cada color se representa por un punto [7].

Muchos espacios de color en uso hoy en día están orientados, bien hacia el hardware (monitores en color e impresoras) o hacia aplicaciones donde la manipulación del color es un objetivo (creación de gráficos en color para animación). Los espacios más comunes orientados al hardware usados en la práctica son el RGB (rojo, verde y azul) para monitores en color y una amplia gama de vídeo cámaras; el CMY (cian, magenta y amarillo) para impresoras a color; y el YIQ para TV en color. En el espacio YIQ, la coordenada Y corresponde a la reflectancia, e I y Q son dos componentes cromáticas llamadas *infase* y *cuadratura* respectivamente. En procesamiento de imágenes se utilizan RGB, YIQ, HSV (matiz, saturación y valor) y HSI (matiz, saturación e intensidad).

Espacio de color RGB

En el espacio RGB cada color aparece en sus componentes espectrales primarias: rojo, verde y azul. Este espacio está basado en el sistemas de coordenadas cartesianas. El sub-espacio del color de interés es el tetraedro mostrado en la figura 2.7. Los valores RGB están en tres vértices, el cian, magenta y amarillo se sitúan en otros tres vértices. El negro corresponde al origen y el blanco en el vértice más alejado del origen. En este espacio, la escala de grises se extiende desde el negro al blanco a lo largo de la diagonal que une esos dos puntos, y los colores son puntos dentro del tetraedro, definidos por vectores desde el origen. Por conveniencia, se asume que todos los vectores han sido normalizados, de modo que el tetraedro de la figura 2.7 es el tetraedro unitario, es decir, todos los valores de R, G y B están en el intervalo $[0, 1]$. Las imágenes en este espacio se forman por la combinación en diferentes proporciones de cada uno de los colores primarios RGB. De acuerdo a la figura 2.7, el blanco representa un valor de 1, el negro 0, el gris claro 0.86 y gris oscuro 0.57.

Espacio de color CIE 1976 $L^*a^*b^*$

El espacio de color CIE 1976 $L^*a^*b^*$ ó CIELAB, es un espacio tridimensional, aproximadamente uniforme, que tiene componentes que pueden ser interpretadas de la siguiente forma: los valores de L^* indican la claridad que va desde el negro al blanco; los valores de a^* indican los colores que van desde los tonos verdes a los rojos y los valores de b^* indican los colores que van desde los tonos azules a los amarillos, como se muestra en la figura 2.8 [93].

Estas componentes derivan de los valores triestímulo (X, Y, Z) como se muestra en las ecuaciones (2.1, 2.2 y 2.3):

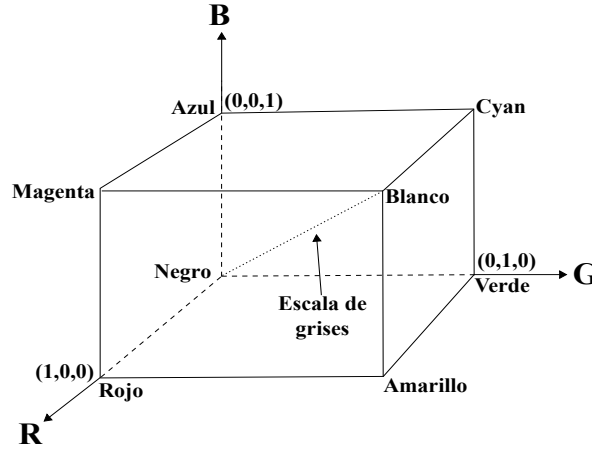


Figura 2.7: Espacio de color RGB.

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (2.1)$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (2.2)$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (2.3)$$

donde,

X, Y, Z : Son los valores medidos de la muestra de color.

X_n, Y_n, Z_n : Son los valores de referencia de la fuente de luz blanca.

C_{ab}^* es el croma, que determina la variación de color basada en las componentes a^* y b^* , su valor corresponde a la distancia con respecto al centro de la esfera de color (magnitud del vector) y representa la saturación o pureza del tono, la cual, se calcula por medio de la ecuación 2.4.

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2.4)$$

h_{ab} es el ángulo de tono, su origen esta definido en el eje $+a^*$ y se expresa en grados; es decir, 0° corresponde a $+a^*$ (rojo), 90° corresponde a $+b^*$ (amarillo), 180° corresponde a $-a^*$ (verde) y a 270° corresponde a $-b^*$ (azul); nos indica el tono y se calcula por medio de la ecuación 2.5.

$$h_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2.5)$$

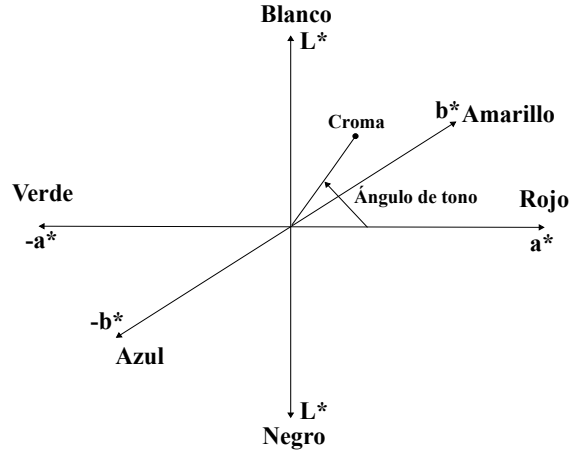


Figura 2.8: Espacio de color CIELAB.

Debido a que es importante identificar cambios o variaciones entre tonos muy cercanos, se requiere calcular la diferencia entre los tonos. En un espacio tridimensional, la distancia entre dos puntos se calcula con la distancia Euclidiana. La distancia Euclidiana en el espacio de color CIELAB puede ser utilizada para representar aproximadamente la magnitud percibida entre las diferencias de color de un objeto. Sin embargo, se requiere calcular algunos parámetros para obtener las diferencias de color (que se denotan con subíndices 0 y 1), ya sea en coordenadas cartesianas (ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8) o polares (ecuaciones 2.6, 2.9, 2.10 y 2.11).

Las diferencias de color para CIELAB en coordenadas cartesianas se expresan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta L^* = L_1^* - L_0^* \quad (2.6)$$

$$\Delta a^* = a_1^* - a_0^* \quad (2.7)$$

$$\Delta b^* = b_1^* - b_0^* \quad (2.8)$$

Las diferencias de color para CIELAB en coordenadas polares se expresan por medio de:

$$\Delta C_{ab}^* = C_{ab,1}^* - C_{ab,0}^* \quad (2.9)$$

$$\Delta h_{ab} = h_{ab,1} - h_{ab,0} \quad (2.10)$$

$$\Delta H_{ab} = \sqrt{(\Delta E_{ab})^2 - (\Delta L^{*2} + \Delta C_{ab}^{*2})} \quad (2.11)$$

Las diferencias de color entre dos muestras deben de calcularse de la siguiente manera (ecuaciones 2.12 y 2.13):

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.12)$$

O,

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2} \quad (2.13)$$

Elevando al cuadrado la ecuación 2.13 (ΔE_{ab}^*), se obtiene la contribución de cada componente y su intervención en el cambio de color, lo cual, puede ser utilizado como una interpretación gráfica en el análisis de los datos, su expresión está dada por la ecuación 2.14 :

$$\Delta E_{ab}^{*2} = (\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2 \quad (2.14)$$

2.1.4. Esquema de visión digital del color

El esquema de visión digital del color mostrado en la figura 2.9, se obtiene con base en la teoría descrita previamente, donde se puede apreciar como interactúan los elementos necesarios para llevar a cabo la visión digital del color. El iluminante, se encarga de proporcionar la luz para irradiar al objeto, que a su vez absorbe y refleja ciertas longitudes de onda. El observador, tiene la tarea de emular matemáticamente el funcionamiento del sistema visual humano. El espacio de color cumple la función de representar la información generada por los elementos previos en un espacio finito de valores.

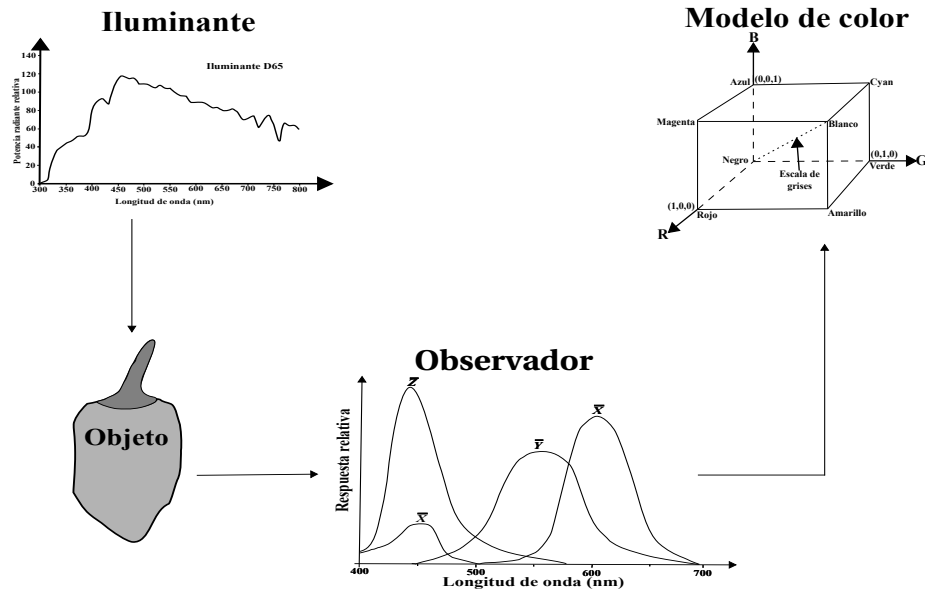


Figura 2.9: Esquema de visión digital del color.

2.2. Sistemas de visión por computadora

Desde una perspectiva general, la visión artificial o visión por computadora es la capacidad que tiene la máquina para ver el mundo que le rodea, para deducir la estructura y las propiedades del mundo tridimensional a partir de una o más imágenes bidimensionales.

En los sistemas de visión por computadora, la *escena tridimensional* es vista por una, dos o más cámaras para producir imágenes monocromáticas o en color. Las *imágenes adquiridas* pueden ser *segmentadas* para obtener de ellas características de interés tales como *bordes* o *regiones*. Posteriormente, de las características se obtienen las propiedades subyacentes mediante el correspondiente proceso de *descripción*. Con la cual se consigue la estructura de la escena tridimensional requerida por la *aplicación* de interés. El proceso de visión por computadora se muestra en el diagrama a bloques de la figura 2.10.

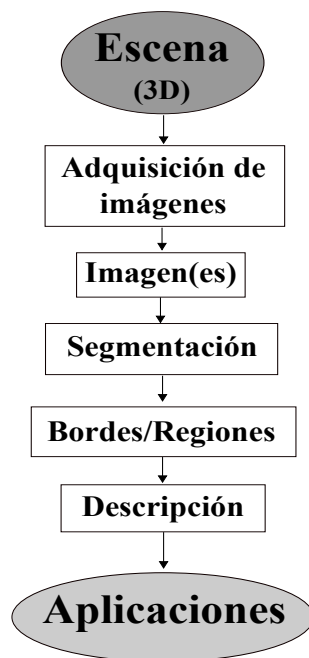


Figura 2.10: Diagrama a bloques del proceso de visión por computadora.

Para la adquisición de imágenes digitales se requieren dos elementos básicos. El primero es un dispositivo físico que es sensible a una determinada banda del espectro de energía electromagnético (tal como rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, sonar, escáner de láser) que produce una señal eléctrica de salida proporcional al nivel de energía incidente en cualquier instante de tiempo. El segundo, denominado digitalizador, es un dispositivo para convertir la señal eléctrica de salida continua del primer dispositivo físico en forma digital, como se muestra en la figura 2.11.

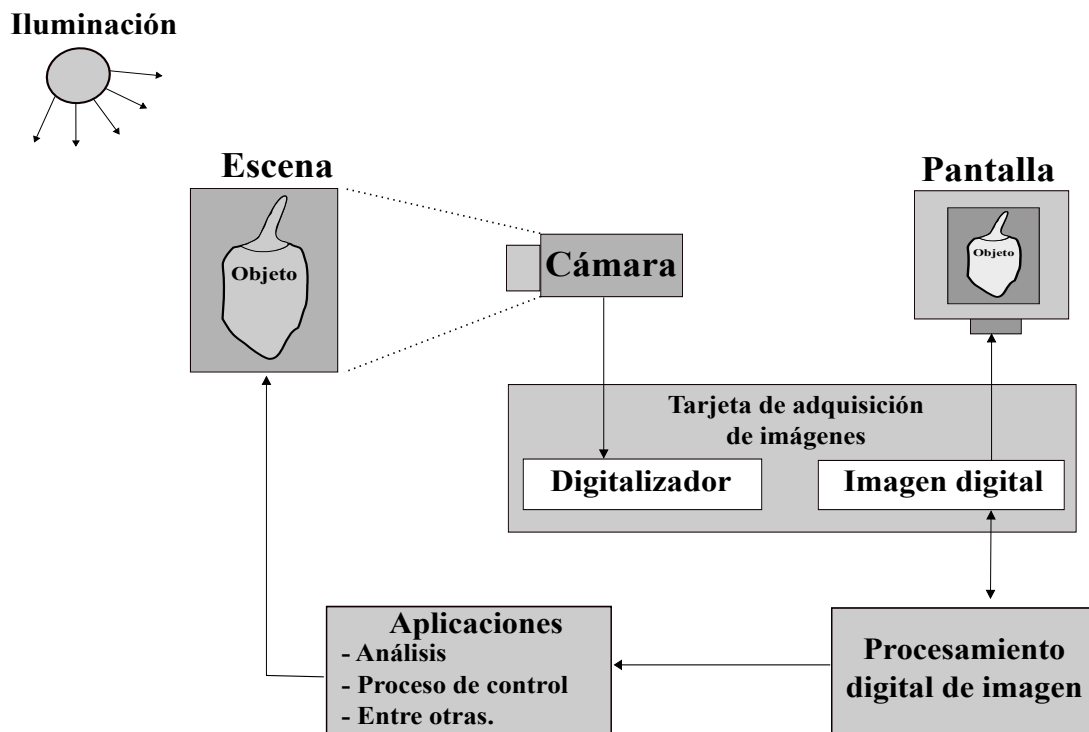


Figura 2.11: Diagrama a bloques del SVC.

La generación de la imagen en un tiempo particular conlleva el muestreo de la imagen definida de forma continua en un conjunto discreto de localizaciones del plano de la imagen y luego la valoración o cuantización de dicha muestra. Una vez que se cualifican las señales en espacio y en amplitud se obtiene una imagen digital, que es como se representa en la computadora. Es decir, una matriz de números enteros en la cual cada valor entero representa la reflectancia de los objetos de la escena en un tiempo discreto y en un punto discreto del plano de la imagen.

En definitiva, independientemente del tipo de sensor utilizado, la imagen que ha de ser tratada por el computador se presenta digitalizada espacialmente en forma de matriz con una resolución de $M \times N$ elementos. Cada elemento de la matriz denominado *pixel* (picture element) tendrá un valor asignado, que se corresponde con el nivel de luminosidad del punto correspondiente en la escena captada, dicho valor es el resultado de la cuantización de intensidad o nivel de gris. Los términos intensidad y nivel de gris se suelen usar indistintamente.

2.2.1. Representación de imágenes digitales

El término *imagen* se refiere a una función de intensidad bidimensional que se representará indistintamente, dependiendo del contexto y de la nomenclatura utilizada por

los métodos originales, como $f(x, y)$, $f(i, j)$, $I(i, j)$, $E(x, y)$, $g(x, y)$, $g(i, j)$ etc., donde x e y o bien i y j son las coordenadas espaciales y el valor de f , I , E o g en cualquier punto (x, y) o (i, j) es proporcional la intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto. La figura 2.12 muestra la convención de ejes para imágenes digitales.

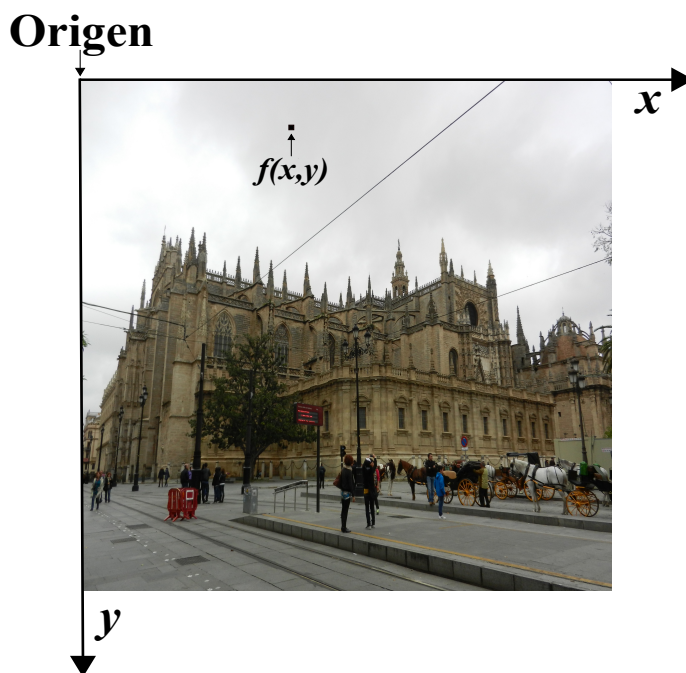


Figura 2.12: Convención de ejes utilizada para la representación de imágenes digitales.

Una imagen puede ser definida como una función en dos dimensiones, $f(x, y)$ donde x e y son coordenadas *espaciales* en un plano, y la amplitud de f en cualquier par de coordenadas (x, y) se llama *intensidad* o *nivel de gris* de la imagen en ese punto. Cuando x , y , y los valores de intensidad de f son todos finitos, y cantidades discretas, la imagen se puede llamar imagen digital. El campo de procesamiento digital de imágenes se refiere al procesamiento de imágenes digitales por medio de una computadora digital. Nótese que la imagen digital está compuesta por un número finito de elementos, donde cada uno tiene un valor y ubicación particular. Estos elementos son llamados elementos de la imagen o píxeles. El pixel es el término ampliamente utilizado para denotar los elementos de una imagen digital [6].

Segmentación

La segmentación es el proceso por el cual se extrae de la imagen cierta información subyacente para su posterior uso. La segmentación está basada en dos principios

fundamentales: discontinuidad y similitud. La segmentación orientada a bordes (discontinuidad) y la orientada a regiones (similitud). Una región es en general un área de la imagen en la que sus píxeles poseen propiedades similares (de intensidad, color, etc.), mientras que un borde es una línea que separa dos regiones, por tanto de diferentes propiedades (discontinuidad). Tanto la detección de bordes como la de regiones implican una manipulación de la imagen original de forma que los valores de los píxeles originales son modificados mediante ciertas funciones de transformación u operadores.

Para la detección de bordes, se proponen los siguientes tipos de operadores (basados en la discontinuidad):

- Operadores primera derivada.
- Operadores segunda derivada.
- Operadores morfológicos.

Mientras que para la detección de regiones se proponen algunas técnicas basadas en la similitud:

- Binarización en el uso de umbrales.
- Crecimiento de regiones mediante la adición de píxeles.
- División de regiones.
- Similitud de textura, color o nivel de gris.

A veces la calidad de la imagen no es suficientemente buena, de forma que no se puede extraer la información adecuadamente, ello implica tener que utilizar ciertas técnicas de mejora de la calidad de la imagen original. Son dos los procesos que pueden considerarse dentro de esta etapa, a) suavizado y b) realzado. El primero se encamina hacia la supresión del ruido introducido durante la captura de la imagen, mientras que el segundo está encaminado a eliminar los falso reflejos y sombras que dificultan también la extracción de la información para el procesamiento de la imagen.

Muchas de las operaciones descritas se pueden enfocar desde dos perspectivas distintas:

Dominio espacial: el procesamiento se lleva a cabo mediante operaciones que consideran los píxeles en sus posiciones espaciales dentro del plano de la imagen y los niveles de intensidad asociados.

Dominio de la frecuencia (espectral): es preciso realizar algún tipo de transformación de forma que se trabaje con las componentes de frecuencia. Entre las transformaciones más útiles destacan las transformada de Fourier, del coseno etc.

Bordes o regiones

Una vez detectados los bordes o regiones, como elementos de interés, la descripción consiste en extraer propiedades o atributos para su uso en las aplicaciones. Básicamente, se trata de reconocer las diferentes estructuras de la imagen para su identificación de forma inequívoca. Se puede diferenciar entre descriptores de bordes, cuyo objetivo es la identificación de los bordes mediante el ajuste de rectas, curvas, funciones polinómicas, códigos encadenados etc., y descriptores de regiones, encaminados a obtener propiedades tales como color, textura, superficie, nivel medio de intensidad, etc.

Aplicaciones

Existen cuatro grandes áreas de aplicación de visión por computadora, las cuales se mencionan a continuación:

- Obtención de la distancia de los objetos en la escena tridimensional y estructura tridimensional.
- Detección de objetos en movimiento.
- Reconocimiento de patrones y formas.
- Reconocimiento de objetos tridimensionales.

El objetivo final está en utilizar la visión para reconocer, manipular, predecir, relacionar, navegar, etc.

Se puede detectar la presencia de objetos en movimiento mediante la comparación de una secuencia de imágenes obtenidas de la escena tridimensional en diferentes instantes de tiempo. Una simple diferencia entre los niveles de intensidad de las distintas imágenes en relación con una imagen de referencia puede ser suficiente. El reconocimiento de formas y patrones puede concretarse en que los diferentes objetos van a estar caracterizados por una determinada forma de su contorno, que se describe de alguna manera o bien por la región que delimitan y sus propiedades subyacentes. En definitiva, los bordes y regiones son estructuras a considerar.

Las técnicas de obtención de las formas a partir de las sombras (en terminología inglesa, *shape from shading*) también se encamina a la obtención de la estructura tridimensional, si bien mediante el conocimiento de la iluminación recibida por la escena y la determinación del punto de observación de la misma.

Es posible la obtención de la distancia a la que se encuentran los objetos en la escena tridimensional mediante la utilización de técnicas de visión estereoscópica. Una vez obtenida la distancia de los diferentes objetos en la escena se puede realizar la reconstrucción tridimensional de dicha escena. Básicamente, un sistema estereoscópico consta de dos cámaras alineadas y separadas una determinada distancia, de suerte que ambas captan prácticamente la misma escena y generan dos imágenes muy similares. Estas imágenes sólo se diferencian en que la escena está ligeramente desplazada en una imagen con respecto a la otra. Teniendo en cuenta este hecho se trata de identificar

características en ambas imágenes que corresponden a la misma entidad física de la escena tridimensional. Una vez establecida la correspondencia entre características y conociendo la geometría del sistema estereoscópico, es relativamente sencillo obtener la distancia de los objetos.

Finalmente, cabe añadir además que son abundantes las áreas y campos de la ciencia donde se puede utilizar algún proceso de visión por computadora. A continuación se citan algunas áreas de la ciencia con mención de algunos procesos de utilidad, que no son ni únicos ni exclusivos del área en cuestión:

- **Computadoras:** soluciones de Software y Hardware para los diferentes métodos. Implementación en arquitecturas paralelas para desarrollo de algoritmos en tiempo real.
- **Microscopía:** crecimiento de bacterias, número de partículas existentes en una muestra y dimensión de las mismas, reconocimiento de partículas.
- **Astronomía:** número de estrellas en una determinada imagen, identificación por el tamaño.
- **Robótica:** navegación y detección de distancias en el entorno de movimiento del robot, identificación de objetos, identificación de obstáculos.
- **Cartografía:** identificación y detección de límites y áreas en las superficies, reconstrucción de la escena tridimensional.
- **Control de calidad:** en alimentación (análisis postcosecha, en línea de producción, calidad del producto, caracterización del producto, entre otras), en procesos de producción metalúrgicos, textiles, etc.
- **Seguridad:** detección de objetos en movimiento.
- **Otros:** reconocimiento de objetos y caracteres, lectura de paneles y documentos.

Es obligado mencionar que el tratamiento de las imágenes expuesto anteriormente, hasta llegar a las aplicaciones requiere un elevado costo computacional. En efecto, en el tratamiento de imágenes esto constituye un verdadero problema. Muchos analistas han desarrollado técnicas para ser implementadas en sistemas basados en arquitecturas paralelas.

2.2.2. Procesamiento digital de imágenes a color

El uso del color en el procesamiento de imágenes está motivado por dos factores principales. En primer lugar en el análisis de imágenes el color es un potente descriptor que a menudo simplifica la identificación y extracción de objetos de una escena. En segundo lugar, el ojo humano puede distinguir una amplia gama de colores comprado con los niveles de gris [7].

En el tratamiento de imágenes o el procesamiento de las imágenes en color se divide en dos áreas fundamentales: *color* propiamente dicho y *pseudocolor*. En la primera categoría se procesan las imágenes obtenidas con un sensor de color o multiespectral, mientras que en la segunda las imágenes monocromas son coloreadas por asignación de un color a un determinado nivel de intensidad.

La imagen a color en el espacio RGB se muestra en la figura 2.13. La imagen original a color se encuentra separada en tres canales (R, G y B), donde cada pixel contiene información de la contribución correspondiente a longitud de onda del canal. La imagen tiene dimensiones $m \times n \times 3$.

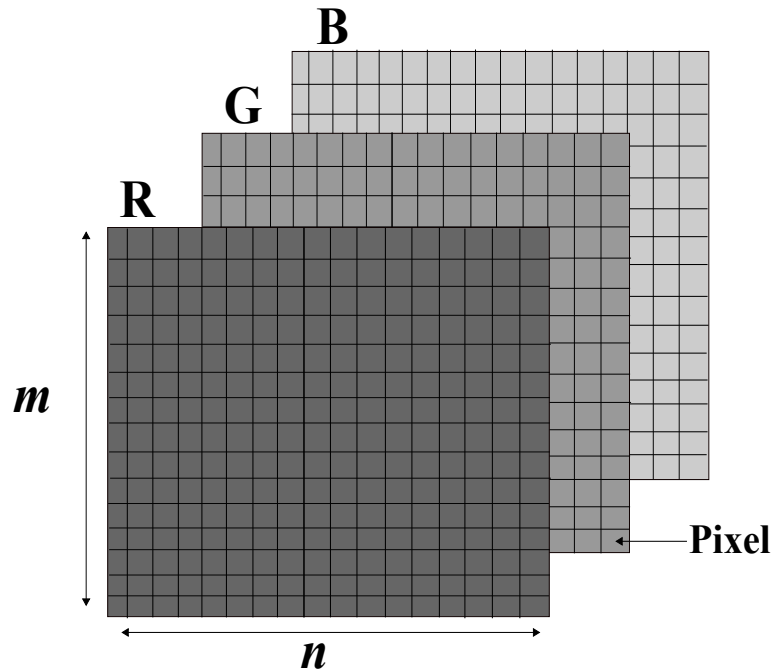


Figura 2.13: Imagen a color en el espacio RGB.

2.2.3. Procesamiento digital de imágenes hiperespectrales NIRS

Durante las últimas décadas, diferentes técnicas se han explorado como posibles métodos instrumentales para la evaluación de la calidad de los productos alimenticios. En los últimos años, la técnica de imagen hiperespectral ha sido considerada como un instrumento de análisis inteligente y prometedor para los estudios llevados a cabo en la investigación, el control y la industria [35].

Las imágenes hiperespectrales son una técnica que genera un mapa espacial de la variación espectral (en la región espectral NIR, que se ubica desde el extremo de las longitudes más altas del visible, alrededor de 780 nm, hasta los 3000 nm) [66], por lo

que es una herramienta útil en muchas aplicaciones. El principal ímpetu para el desarrollo de un sistema de imágenes hiperespectrales es integrar las técnicas espectroscópicas y de imagen para permitir la identificación directa de los diferentes componentes y su distribución espacial en la muestra analizada. Un sistema de imágenes hiperespectrales produce una matriz espacial de dos dimensiones con un arreglo de vectores que representa el espectro en cada ubicación de pixel. El conjunto de datos tridimensional resultante que contiene las dos dimensiones espaciales y una dimensión espectral se conoce como el cubo de datos o hipercubo [35], [62], [63], [61], [65]. Las ventajas de las imágenes hiperespectrales sobre los métodos tradicionales incluyen un mínimo de preparación de la muestra, su naturaleza no destructiva, los tiempos de adquisición rápida y la visualización simultánea de la distribución espacial de numerosas composiciones químicas. La técnica de imagen hiperespectral en la actualidad afronta muchos desafíos para ser aceptada como la herramienta analítica más preferible en la identificación de las huellas de composición de los productos alimenticios y su autenticación. La necesidad de métodos rápidos y confiables de autenticidad y de identificación de objetos ha incrementado el interés en la aplicación de imágenes hiperespectrales para el control de calidad en las industrias agrícolas, farmacéutica, y de alimentos. El uso de imágenes hiperespectrales, tanto para detección automática de objetivos y el reconocimiento de su composición analítica, es relativamente nuevo y es una área de oportunidad para la investigación.

Imágenes hiperespectrales NIRS

La espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIRS) combina la espectroscopia convencional con el procesamiento de imagen digital. La información espectral y espacial se registra simultáneamente proporcionando un espectro NIR por cada pixel de la imagen de la muestra. El resultado consiste en un conjunto de datos tridimensional, que se denomina cubo de datos hiperespectral (figura 2.14). Los ejes m y n representan la información espacial, mientras que el eje K se corresponde con el eje de la longitud de onda (medida espectral). El cubo de datos hiperespectral se transforma en un conjunto de imágenes, que proporcionan información sobre la distribución de cada componente químico de la superficie de la muestra [59].

El hipercubo se puede ver en el dominio espacial como imágenes ($m \times n$) a diferentes longitudes de onda o en el dominio espectral como vectores espectrales en todas las longitudes de onda, como se puede apreciar en la figura 2.14. Ambas representaciones son esenciales para el análisis de los datos hiperespectrales con las herramientas quimiométricas adecuadas utilizando una o varias de las técnicas de análisis multivariable. Por ejemplo, si una imagen hiperespectral tiene las dimensiones de $256 \times 320 \times 128$, este cubo de imagen puede ser interpretado como 128 imágenes de un solo canal, cada uno con 256×320 píxeles. Alternativamente, el mismo hipercubo se puede ver como 81.920 espectros, cada uno con 128 puntos de longitud de onda. Esta enorme cantidad de datos no solo plantea desafíos de minería de datos, sino que también crea nuevas oportunidades para el descubrimiento detallado de la información oculta [57].

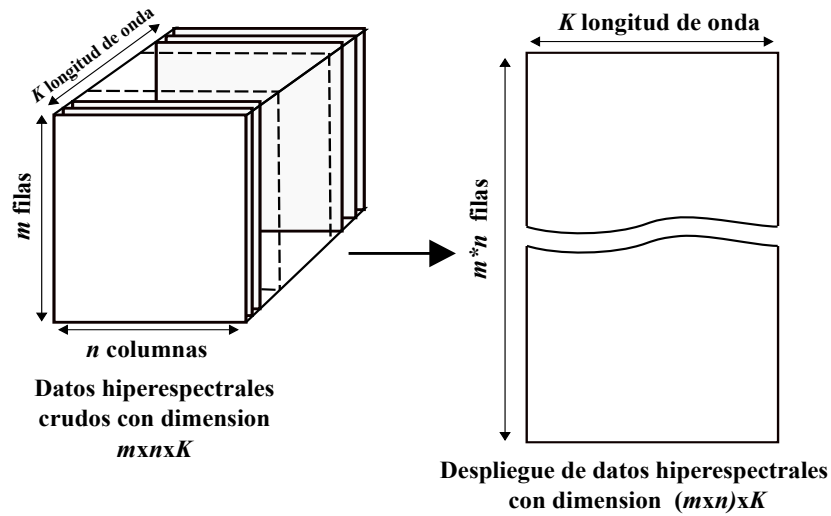


Figura 2.14: Despliegue de datos hiperspectrales (hipercubo) para facilitar el análisis multivariable.

Las imágenes hiperspectrales aprovechan el hecho que todos los materiales, debido a la diferencia de su composición química y estructura física inherente, reflejan, dispersan, absorben y/o emiten energía electromagnética en patrones distintivos en longitudes de onda específicas. Esta característica se denomina firma espectral o huella espectral, o simplemente espectro. Cada elemento de imagen (pixel) de la imagen hiperspectral contiene su propia firma espectral. Brevemente, la firma espectral se define como el patrón de reflexión, absorbancia, transmitancia, y/o emisión de energía electromagnética en longitudes de onda específicas. En principio, la firma espectral se puede utilizar para (de forma única) caracterizar, identificar y discriminar por clase/tipo de cualquier objeto (s) dado en una imagen sobre una banda de longitud de onda suficientemente amplio [64].

La característica más importante de esta técnica es que, además de la identificación y cuantificación de componentes químicos presentes en la muestra, se obtiene simultáneamente su distribución espacial. Por consiguiente, las imágenes hiperspectrales permiten visualizar la estructura y explicar la distribución y tamaño de agregado de cada componente químico de la muestra, parámetros que pueden relacionarse con la calidad del producto [59].

Modos de captura en NIR

Un espectro NIR se puede capturar de tres modos diferentes: transmitancia, reflectancia y transreflectancia. La diferencia básica entre los tres tipos de medidas es la posición de la muestra en el instrumento, como se indica en la figura 2.15.

Cuando una radiación electromagnética (I_0 , ecuación 3.1) incide en la muestra (fi-

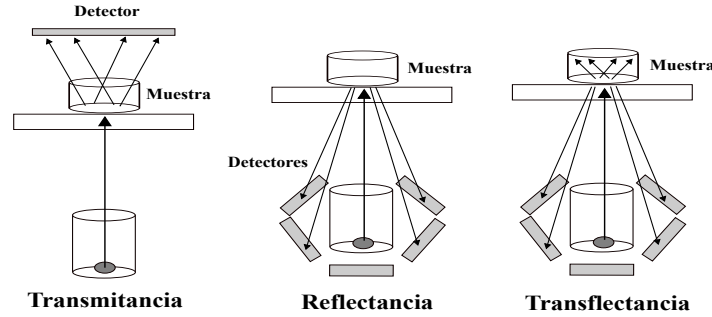


Figura 2.15: Modos de captura NIR.

Figura 2.16) puede sufrir diferentes fenómenos como: absorción (I_A), transmisión (I_T) y reflexión (I_R) [60].

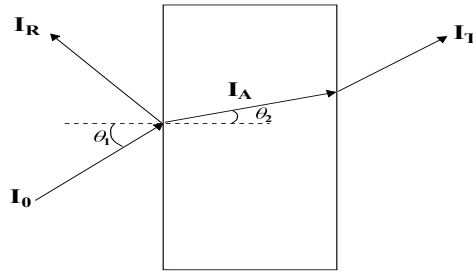


Figura 2.16: Fenómeno de absorción, transmisión y reflexión de la radiación electromagnética al interactuar con la materia.

$$I_0 = I_A + I_T + I_R \quad (2.15)$$

2.3. Chile Habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

El chile Habanero es una especie del género *Capsicum*, el cual, es originario de las zonas húmedas y tropicales de Sudamérica, que pertenece a la familia de las Solanáceas e incluye chiles de importante valor económico. El género *Capsicum* es de los vegetales y especias más viejos y populares del mundo. Existen varias especies del género *Capsicum*, pero tres de ellas han sido ampliamente difundidas por sus bayas calientes o

picantes, las cuales son: *Capsicum annuum*, *Capsicum frutescens* y *Capsicum chinense*. El chile Habanero es un fruto de la especie *Capsicum chinense* Jacq., una variedad muy aromática.

En general, este género contiene algunos de los chiles más picantes del mundo[94]. Los frutos de este género juegan un papel nutricional importante en muchas culturas, al servir como fuente de vitamina C. La pungencia esta asociada de muchas maneras al género *Capsicum*, lo cual lo hace un fruto apetecible en fresco o seco [95].

En años recientes, el chile Habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) se ha vuelto cada vez más importante como resultado de su amplia diversidad y su alto nivel de picor o pungencia, que lo hace un producto muy deseable en muchos países [96]. Además, de contener capsaicina, la cual es un compuesto químico que se encuentra en diferentes frutos, alimentos y productos que se relaciona con la sensación de pungencia (sensación de calor) o picor. Este género se distingue por su alto contenido en capsaicina, compuesto al que, junto con sus análogos se le han atribuido muchas propiedades medicinales.

El contenido de capsaicina se determina por medio de la escala Scoville, ya que, indica el nivel de pungencia y proporciona el contenido presente de capsaicina. Tal escala, inicia en 0 (Scoville Heat Units (SHU), por siglas en inglés), lo cual se cataloga como “no pungente”(por ejemplo, el pimiento verde) y llega hasta 16,000,000 SHU extremadamente pungente, lo cual sería capsaicina pura. Los chiles Habaneros se encuentran entre 100,000 a 350,000 unidades Scoville.

2.3.1. Variedad Jaguar

La variedad Jaguar, es el resultado de un amplio proceso de selección e investigación por parte del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en el Centro de Investigación Regional del Noroeste, campo experimental las “Huastecas”. El método genotécnico utilizado para la obtención de la variedad fue el de Pedigrí, considerando para la selección las características de planta y fruto, ciclo de producción y tolerancia a factores bióticos (mancha bacteriana, pudriciones de la raíz, enfermedades virales y minador de la hoja) y ambiente extremo; desde la década de los 80's y principios de los 90's en el siglo pasado. El material seleccionado, posteriormente, pasó a ensayos de rendimiento y calidad en las zonas productoras de Tamaulipas, San Luis Potosí, Veracruz, Campeche, Yucatán y Quintana Roo, hasta llegar a su validación comercial. También, en la etapa final del desarrollo de la variedad, se realizaron estudios de las características de calidad del fruto y vida de anaquel.

Luego de ocho ciclos de selección, destacó la línea HQR-5, la cual se liberó como nueva variedad, misma que obtuvo su registro definitivo ante el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS) y se colocó en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) con el No. CHL-008-101109, y en 2011 el Título de Obtentor con No. 0664 con vigencia al 9 de junio del 2026.

Características de la planta

La variedad Jaguar presenta plantas que crecen a una altura de 80 a 90 cm en campo abierto y hasta 1.80 m de altura en sistemas de agricultura protegida (macrotúneles e invernadero) con tutoreo. La variedad Jaguar, tiene buena cobertura de follaje, sin pubescencia (hoja que presenta pelillos que retienen el rocío matutino), las hojas son grandes con una longitud de 6.5 a 10.5 cm, y de 3.0 a 4.2 cm de ancho, en su parte más ancha. La ramificación es de tipo basal escalonada, con cinco a siete ramas primarias, con buena capacidad para producir puntos fructíferos, algunas de las características de la planta se pueden observar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Características de la planta de la variedad Jaguar de chile Habanero.

Característica:	Valor de referencia:
Altura de la planta (cm)	80 a 90
Amplitud de follaje (cm)	75 a 120
Longitud de la hoja (cm)	6.5 a 10.5
Ancho de la hoja (cm)	3.0 a 4.2
Pubescencia del follaje	Sin Pubescencia
Ramificación	Basal escalonada
No. de ramas primarias	5 a 7
Días de floración	70 a 85
Días a primera cosecha	115 a 120

La variedad Jaguar tiene flores de color blanco. Tiene de una a tres flores por nudo, las cuales pueden dar origen a la misma cantidad de frutos característica típica de la especie *Capsicum chinense* Jacq. Esta variedad inicia su floración entre los 70 y 85 días después de la siembra, y su cosecha se inicia de 115 a 120 días. La variedad presenta una floración continua, como es el caso de la mayoría de las variedades de chile.

La variedad alcanza buenos rendimientos (más de 15 toneladas por hectárea) en zonas productoras con buen temporal (centro-sur de Veracruz, Campeche, Chiapas), o en diferentes sistema de producción con riego y tecnología media alta; sin embargo, expresa mejor potencial de rendimiento bajo el esquema de riego por goteo y fertirrigación, donde puede superar las 30 toneladas por hectárea de producción total a campo abierto, y más de 36 toneladas por hectárea bajo condiciones de agricultura protegida.

Características del fruto

Los frutos de la variedad Jaguar son uniformes, de color verde esmeralda en estado verde sazón, que pasan a anaranjado brillante en madurez total, atractivos para el mercado en ambos estados de madurez.

Para medir el color en chiles y en diferentes productos alimentarios, es común utilizar el espacio de color CIELAB, antes descrito en la sección 2.1.3, en donde los colores varían

dentro de un diagrama de color que va desde $h_{ab} = 0^\circ$ (rojo), $h_{ab} = 90^\circ$ (amarillo), $h_{ab} = 180^\circ$ (verde) y $h_{ab} = 270^\circ$ (azul), y que depende de las componentes CIELAB a^* y b^* que indican el tono, además, de la componente CIELAB L^* que indica la claridad del tono en la escala de 0 a 100 %.

La variedad Jaguar que es de color anaranjado intenso en estado maduro y tiene un valor en ángulo de tono en $h_{ab} = 54^\circ$. Para el estado en coloración verde, el intervalo en chiles fluctúa entre verde amarillento ($h_{ab} \leq 119^\circ$), verde esmeralada ($h_{ab} = 120^\circ$ a $h_{ab} = 130^\circ$) y verde oscuro ($h_{ab} \geq 131^\circ$). La variedad Jaguar presenta un color verde esmeralda con un ángulo de tono en $h_{ab} = 123^\circ$ en estado verde sazón [97].

Los frutos de la variedad Jaguar tienen una longitud de 3.8 a 5.5 cm y 2.5 a 3.0 cm de diámetro. El peso de fruto de la variedad es de 6.5 a 10 gramos, característica excelente para el mercado. Además, se considera que la variedad Jaguar presenta buena firmeza de fruto ($58.3 \frac{N}{cm^2}$), lo que proporciona resistencia al transporte y buena vida de anaquel.

2.3.2. Variedad Mayan K'iin

La variedad Mayan K'iin surge como resultado de la investigación y selección, durante más de una década, por parte del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Una de las característica más destacada de esta variedad, es que alcanza las 946 mil 360 unidades Scoville. Como nueva variedad, se obtuvo su registro definitivo ante Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS) y se agregó en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) con el No. CHL-018-291110, junto con otras siete variedades, generadas en el CICY.

Capítulo 3

Desarrollo del Trabajo de Investigación

3.1. Introducción

En este capítulo se describe el desarrollo del trabajo de investigación realizado para la evaluación de un sistema de visión por computadora (SVC) para el análisis del color en chiles Habaneros en post-cosecha. La sección 3.2 inicia con la descripción de los montajes utilizados como SVC para la etapa de adquisición de imágenes. Posteriormente, se enfoca en el diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores (RIS) para el monitoreo de variables ambientales, que registra de forma continua las condiciones en el laboratorio. Después de tener un SVC y una RIS, se llevaron a cabo los experimentos que generaron una base de datos de imágenes, las cuales se procesaron por medio de algoritmos para el procesamiento digital de imágenes, cuyos diagramas de flujo y funcionamiento se describen en la sección 3.3. Para reforzar la información relacionada con el color y fortalecer su interpretación, así como el vínculo que existe con los compuestos químicos o pigmentos que lo forman, se realizó una colaboración científica con el Laboratorio de Color y Calidad de Alimentos del Departamento de Nutrición y Bromatología de la Facultad de Farmacia de la Universidad de Sevilla a través de una estancia de investigación. Entre las actividades que se realizaron, se puede mencionar la introducción al análisis químico del color, gracias a que se me permitió integrarme en uno de su proyectos de investigación. En la sección 3.4 se describen los proyectos uvas de la Rioja y Colorímetro.

3.2. Montajes utilizados

En esta sección se presentan los montajes utilizados como SVC para la adquisición de imágenes de chiles Habaneros. Estos sistemas de visión se diseñaron y construyeron en el laboratorio del Cuerpo Académico de Comunicaciones e Instrumentación Electrónica (CACIE) de la UABC. En la sección 3.2.1 se describe el primer montaje utilizado,

el cual corresponde a una configuración de la cámara en posición vertical desplazable y muestras fijas, que se opera de forma manual. La sección 3.2.2, muestra el segundo montaje utilizado que corresponde a una configuración de la cámara en posición vertical fija y muestras fijas, que opera de forma automática.

3.2.1. Cámara en posición vertical desplazable y muestras fijas

Esta configuración se propuso como montaje preeliminar para generar una base de datos con imágenes digitales bajo un ambiente controlado y poder iniciar el desarrollo de los algoritmos para el tratamiento de las mismas. Cabe resaltar que antes de utilizar esta configuración, se construyeron otro tipo de arreglos para la cámara, los que se fueron mejorando hasta obtener el montaje, que se muestra en la figura 3.1.

Este montaje esta conformado por los siguientes elementos: una estructura base, una cámara digital y lámparas fluorescentes de 40W como fuente de iluminación. La estructura base, incluye un espacio para la colocación de las muestras. El fondo sobre el que se colocan las muestras es de color azul y corresponde al color opuesto y de mayor contraste con respecto a las muestras en evaluación, considerando la evolución de madurez de los chiles Habaneros variedad Jaguar (cuyo cambio en color va desde los tonos verdes hasta los tonos naranjas). La estructura cuenta también con rieles para el desplazamiento horizontal y vertical de la cámara, posicionamiento que se lleva a cabo de forma manual. La cámara a color modelo DCU223C de Thorlabs consta de un sensor tipo CCD (Sony ICX204AK, con dimensiones de 5.95 mm x 4.76 mm), puede capturar hasta 30 cuadros por segundo y su resolución es de 1280x1024 pixeles. En el manejo de la cámara se utiliza el software uc480 V 3.3 proporcionado por el fabricante.

Para operar este montaje se realiza el siguiente procedimiento: se colocan las muestras en la base con el fondo azul, posteriormente se mueve la cámara hasta la primera muestra, se adquiere y almacena la imagen, después se desplaza la cámara de forma manual a la siguiente muestra y se repite el proceso hasta concluir con todas las muestras. Posteriormente se espera a que transcurra el intervalo de tiempo de muestreo, que, para este montaje corresponde a una imagen individual por cada veinticuatro horas, debido a su condición manual. Los datos obtenidos permiten registrar la evolución color con respecto al tiempo de los chiles Habaneros variedad Jaguar.

Por otro lado, se instaló una red de inalámbrica de sensores (ver sección 3.2.3) dentro del laboratorio para monitorear los parámetros ambientales en tres puntos estratégicos alrededor del experimento. La RIS captura las señales de los parámetros de interés, que para nuestro experimento son: la temperatura (T) y humedad relativa (HR). Una vez que son capturadas las lecturas, estas se envían a un servidor web que almacena y procesa la información, además de mostrarla en una pantalla de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés) en cada ubicación de la red. Gracias al servidor web, se podían consultar en forma remota las gráficas de las variables medidas a través e internet, de forma que se permitiera dar seguimiento a las variaciones de estos parámetros ambientales durante el experimento.

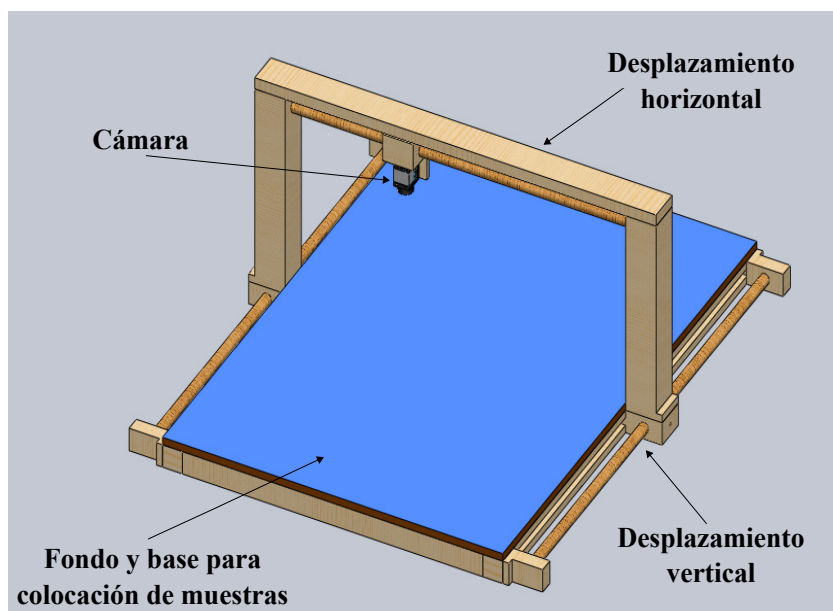


Figura 3.1: Montaje con cámara vertical desplazable y muestras fijas.

3.2.2. Cámara en posición vertical fija y muestras fijas

Con el objetivo de tener mayor capacidad para la identificación de cambios de color con respecto al tiempo, fue necesario incrementar la tasa de muestreo y automatizar el proceso de adquisición de imágenes. Después de implementar y evaluar la adquisición de las imágenes digitales de las muestras con el SVC, descrito en la sección 3.2.1, se propuso implementar una nueva configuración para este trabajo de investigación. Al evaluar los posibles errores introducidos en las imágenes debidas a las partes móviles y la vibración de los motores, se eligió una configuración en donde la cámara se colocó en una posición vertical fija y las muestras se mantuvieron fijas sobre la zona con fondo de alto contraste. Con el fin de mejorar la repetitividad en la captura de imágenes, en el nuevo montaje se diseñó e implementó un sistema electrónico que permite controlar el almacenamiento y captura de imágenes en forma automática. Este montaje, se encuentra confinado dentro de una cabina cerrada, aislada térmicamente y que además incluye un sistema de medición de parámetros ambientales (T y HR), como se muestra en la figura 3.2, de manera que además de adquirir las imágenes digitales proporciona datos sobre las condiciones en las que evolucionaron los frutos durante el experimento.

En resumen, este montaje está constituido por los siguientes elementos: una cabina aislada, un área para colocación de muestras, con un fondo de alto contraste, una cámara digital, una lámpara fluorescente circular, una computadora, un sistema electrónico que incluye un algoritmo para controlar el encendido-apagado de la lámpara, así como la adquisición de las imágenes en forma automática y un sistema de monitoreo de parámetros ambientales. La cabina aislada consta de paneles que mantienen las condi-

ciones internas y esta formada de una estructura de aluminio con dimensiones de 1m cuadrado; los paneles son de color blanco para aumentar la iluminación de la lámpara. Dentro de la cabina, en la parte inferior, se tiene un área destinada para colocar las muestras sobre un fondo de color azul, en donde también se colocan los sensores para medir las condiciones de T y HR. En la parte superior externa de la cabina, se encuentra la cámara y la fuente de iluminación, que es controlada desde una etapa de potencia que se encuentra conectada al sistema de monitoreo y, a su vez, con la computadora para sincronizar el encendido. La cámara digital utilizada es una Nikon D5100 con un sensor CMOS (23.6 mm x 15.6 mm), que tiene una resolución de 16.2 millones de píxeles reales, con una velocidad de obturación 1/400 s a máxima resolución esta cámara permite capturar hasta 4 cuadros por segundo. La cámara se conecta a una computadora, en donde, el algoritmo de adquisición automática, permite configurar la cámara y los tiempos de muestreo (para este montaje se adquiere una imagen cada hora). Por último, el sistema de monitoreo de parámetros ambientales que esta operando en conjunto con el algoritmo de adquisición automática adquiere los valores de las variables de T y HR dentro de la cabina una vez tomada la imagen.

El sistema de operación automática para este montaje utiliza librerías y software libre (Gphoto2 y sistema operativo Linux), para evitar conflictos con licencias y permisos al desarrollar aplicaciones. Por otro lado, para manejar las señales de los sensores de monitoreo se desarrollaron módulos electrónicos que incluyeron una plataforma de hardware libre (Arduino).

El funcionamiento automático de este montaje esta controlado a través de un algoritmo que opera desde una computadora, la cual también incluye una conexión a la cámara del montaje, el funcionamiento del algoritmo se describe en la sección 3.3.1. Para la operación automática del montaje, se tiene una rutina en la computadora que consulta de manera permanente la fecha y hora en un elemento conocido como reloj de tiempo real (RTC por sus siglas en inglés). Cuando el registro de tiempo del RTC corresponde al tiempo preestablecido para capturar una imagen (para este caso cada hora), se lleva a cabo el siguiente procedimiento se envía un mando para indicarle a la lámpara que se encienda por un período preestablecido (5 segundos) antes de activar la cámara para realizar la adquisición de la imagen. Una vez adquirida la imagen, el sistema de monitoreo registra los parámetros de T y HR del interior de la cabina. Posteriormente, la imagen se almacena en la cámara y, después, se descarga en la computadora para generar un respaldo de la información. Luego se envía un mando para apagar en primer lugar la cámara y después de un tiempo determinado (5 segundos) la lámpara, además de poner en estado de reposo la computadora y el sistema de monitoreo hasta que el registro del RTC vuelva a coincidir con el tiempo de captura predeterminado.

3.2.3. Diseño e implementación de red inalámbrica de sensores para el monitoreo de variables ambientales

El diseño de la RIS se propuso de forma modular para la construcción de los elementos de la red. Esto es una propuesta por parte del grupo de investigación CACIE, que

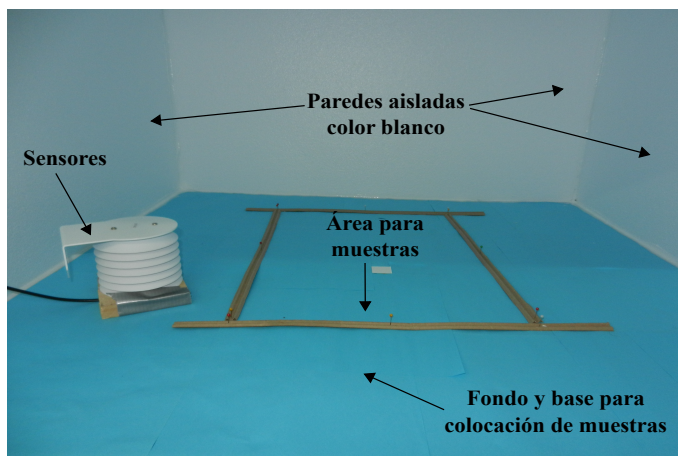


Figura 3.2: Elementos internos del sistema de visión por computadora.

se consideró desde el inicio del diseño; lo que involucra solo integrar los componentes necesarios en cada módulo y que operen por separado del sistema, pero que tengan la capacidad de integrarse a un sistema más complejo y colaborar con la función que le corresponde desempeñar en el sistema.

Módulo: sensores, etapa de instrumentación electrónica

En esta etapa se eligieron e instrumentaron los sensores que desempeñan la tarea de medir las variables de interés, que son la temperatura y la humedad relativa. Para la primer variable se eligió un sensor preciso de temperatura en grados centígrados LM35. El sensor de humedad relativa es el HM1500LF.

Los dos sensores utilizados proporcionan una respuesta lineal respecto sus respectivas variables físicas, las cuales son temperatura y humedad relativa, lo que simplifica el diseño de la instrumentación electrónica asociada. Además, los fabricantes facilitan las rectas de ajuste lineal en sus hojas de especificaciones.

En la figura 3.3 se presenta el diagrama esquemático de la conexión de los sensores para este módulo. Los componentes que lo forman son: terminales para conexión, sensor de temperatura LM35, sensor de humedad relativa HM1500LF, y componentes electrónicos asociados. Los elementos presentes en el diagrama se distribuyen de la siguiente manera: (a) son las terminales de conexión para energizar el circuito, (b) sensor de temperatura, (c) terminales de conexión para sensor de humedad relativa, (d) terminales de salida del módulo.

Módulo: adquisición, etapa de procesamiento de datos

El módulo de adquisición esta formado, principalmente, por un sistema mínimo para el microcontrolador Atmega328, el cuál desempeña las tarea de adquisición de las señales

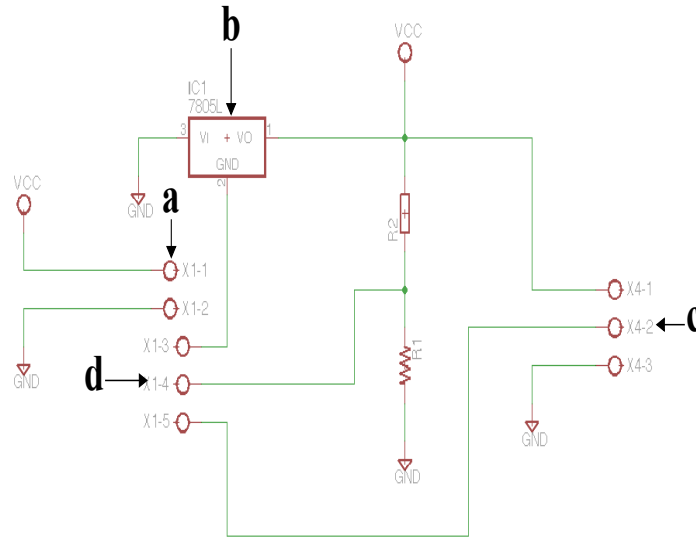


Figura 3.3: Diagrama esquemático de la conexión del módulo sensores.

y la linealización de las mismas. También, cuenta una base para los radios Xbee, que proveen de comunicación inalámbrica a este módulo; además, de reguladores de voltaje a +5v y 3.3V para el microcontrolador y el radio, respectivamente; y componentes electrónicos asociados.

En la figura 3.4 se muestra el diagrama esquemático de la conexión del módulo adquisición. Los componentes que lo forman son: terminales de conexión, regulador de voltaje a +5V (LM7805) y regulador de voltaje a +3.3V (LM78M33C), microcontrolador Atmega328, base de 22 pines para radios Xbee, componentes electrónicos asociados. Los elementos presentes en el diagrama se distribuyen de la siguiente manera: (a) terminal de conexión para energizar el circuito, (b) regulador de voltaje +5V, (c) regulador de voltaje +3.3V, (d) microcontrolador, (f) terminales de conexión para señales analógicas correspondiente al puerto C del microcontrolador, (g) terminal de conexión para puerto serial del microcontrolador, (h) terminales de conexión digitales correspondientes al puerto C del microcontrolador, (i) terminales de conexión digitales correspondientes al puerto B del microcontrolador, (j) circuito para de atenuación para reducir el nivel de voltaje del del pin (Tx) del puerto serial que se conecta con el puerto serial del radio que opera a 3.3V (para evitar dañarlo), (k) base de 22 pines para radios Xbee.

Módulo: LCD, etapa de visualización de datos

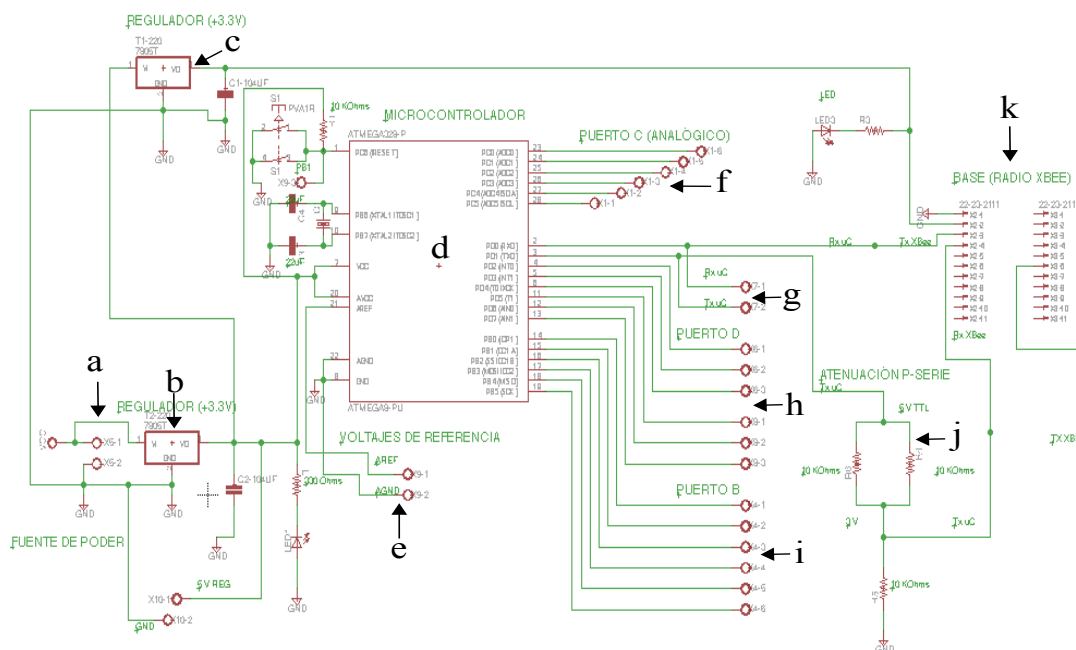


Figura 3.4: Diagrama esquemático de la conexión del módulo adquisición.

En esta etapa el módulo desempeña la tarea de desplegar los datos en la pantalla LCD. El diseño modular, permite que esta pantalla se pueda integrar a un sistema diferente y desplegar otro tipo de datos. El circuito requiere una pantalla LCD de 16 columnas por 2 renglones con un controlador HD44780, terminales de conexión y componentes electrónicos asociados.

En la figura 3.5 se muestra el diagrama esquemático de la conexión de los componentes del módulo lcd. Lo elementos en el diagrama se distribuyen de la siguiente manera: (a) terminales de entrada para energizar el circuito, (b) pines de conexión hacia el módulo LCD, (c) terminales de conexión hacia el microcontrolador, (d) pantalla LCD.

Módulo: fuente de poder, etapa para energizar los circuitos

Esta etapa desempeña la tarea de proporcionar la energía regulada de 110 VAC a 12 VDC, para energizar los módulos. El módulo fuente de poder, consta de un transformador de 110VAC a 12 VAC con derivación central, un puente de diodos rectificadores (que entrega un señal rectificada a +6VDC y -6VDC), reguladores de voltaje a +5VDC (LM7805) y -5VDC (LM7905), un led para indicar que el módulo se encuentra encendido y terminales de salida para cada regulador.

El diagrama esquemático del circuito se muestra en la figura 3.6. La distribución de los componentes en el diagrama es la siguiente: (a) transformador de 110 VAC a

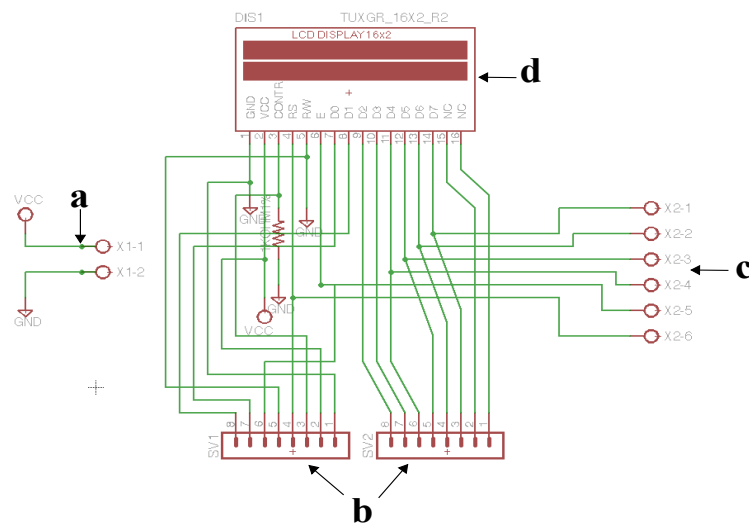


Figura 3.5: Diagrama esquemático de la conexión del módulo LCD.

12 VDC, (b) puente de diodos rectificadores, (c) regulador de voltaje a +5VDC, (d) regulador de voltaje a -5VDC, (e) terminal de conexión de voltaje de salida a +5VDC y (f) terminal de conexión de voltaje de salida a -5VDC.

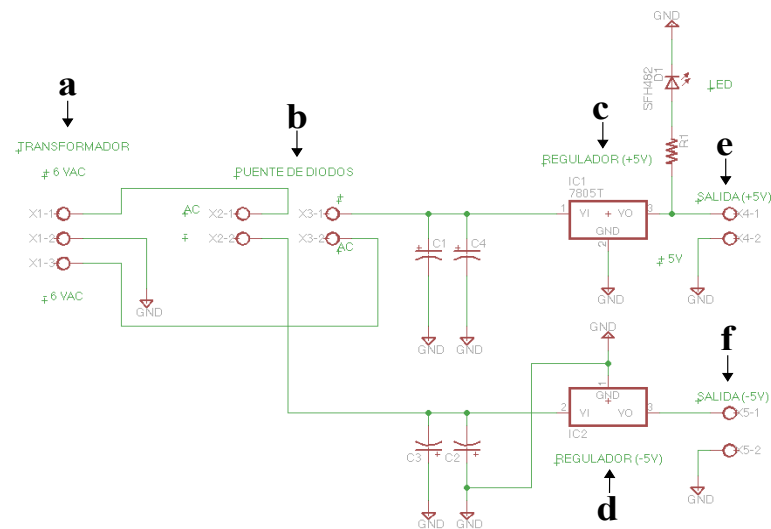


Figura 3.6: Diagrama esquemático de la conexión del módulo fuente de poder.

Software embebido para microcontrolador

La figura 3.7 presenta el diagrama de flujo del algoritmo embebido que contiene el

microcontrolador de la tarjeta instrumentación electrónica. El algoritmo desempeña la tarea de adquirir y linealizar las señales que provienen de los sensores de T y HR que se despliegan en una pantalla LCD y posteriormente, se envían codificados hacia el radio (Xbee); que se encarga de enviar la información de forma inalámbrica hacia el nodo maestro.

La secuencia del algoritmo embebido del diagrama de flujo de la figura 3.7 es la siguiente: como primer paso se cargan las librerías, se configuran los puertos y se declaran las variables. A continuación, se inicializan los dispositivos (incluyendo una pantalla LCD de 16 columnas por 2 renglones) y se sincroniza el puerto serial para que opere a una tasa de transmisión de 9600 bauds. Posteriormente, el software entra en un ciclo infinito, de manera que se repita la secuencia de tareas que realizará el algoritmo de forma indefinida, y dependiendo de las condiciones que se cumplan en la secuencia, como aplicar un “reset” o se quede sin energía el módulo, la secuencia se reinicie a las condiciones iniciales. Las tareas asignadas en este algoritmo son: la lectura de señales presentes en los dos pines del puerto analógico y la conversión de esas lecturas de señales de voltajes a valores numéricos para aplicarles las curvas de ajuste lineal y obtener los valores de las variables físicas de interés. Los valores obtenidos, se despliegan en la pantalla LCD y posteriormente, se envían hacia el puerto serial del microcontrolador que se encuentra conectado con el radio Xbee, el cual se utiliza para la comunicación inalámbrica. Una vez realizadas las tareas descritas previamente, el algoritmo inicializa una rutina que interroga al reloj (RTC) y cuando transcurre el tiempo de espera preestablecido se repite la secuencia de tareas descrita previamente. Para el experimento realizado se estableció un tiempo de espera de 10 minutos, por lo que se registraron las condiciones de temperatura y humedad relativa dentro del laboratorio 6 veces por hora.

Topología de la red

Una vez que se diseñaron y construyeron los módulos independientes, se integraron en una red inalámbrica de sensores, que para esta aplicación, se configuró con una topología tipo estrella; incluyendo un nodo maestro y tres nodos esclavos; además, el nodo maestro se encuentra conectado a un módulo que funciona como servidor web. En la figura 3.8 se muestra la topología de comunicaciones entre los nodos esclavo, el nodo maestro y el servidor web. El diagrama se basa en la distribución que se utilizó en el montaje 1 en el laboratorio del grupo de investigación CACIE. En el esquema se muestra la distribución de tres tipos de elementos principales: (a) servidor web, (b) nodo maestro y (c, d y e) nodos esclavos. En el experimento que utilizó el montaje 1; el nodo esclavo d, se ubicó a un lado del montaje 1 para registrar las variables de T y HR próximos al experimento; lo cual no impidió que la red siguiera proporcionando la información de los tres nodos esclavos, mientras que el servidor web permitía el almacenamiento y despliegue de la evolución de las variables ambientales en la página web del grupo de investigación CACIE.

Módulo: servidor web, etapa para respaldo de datos

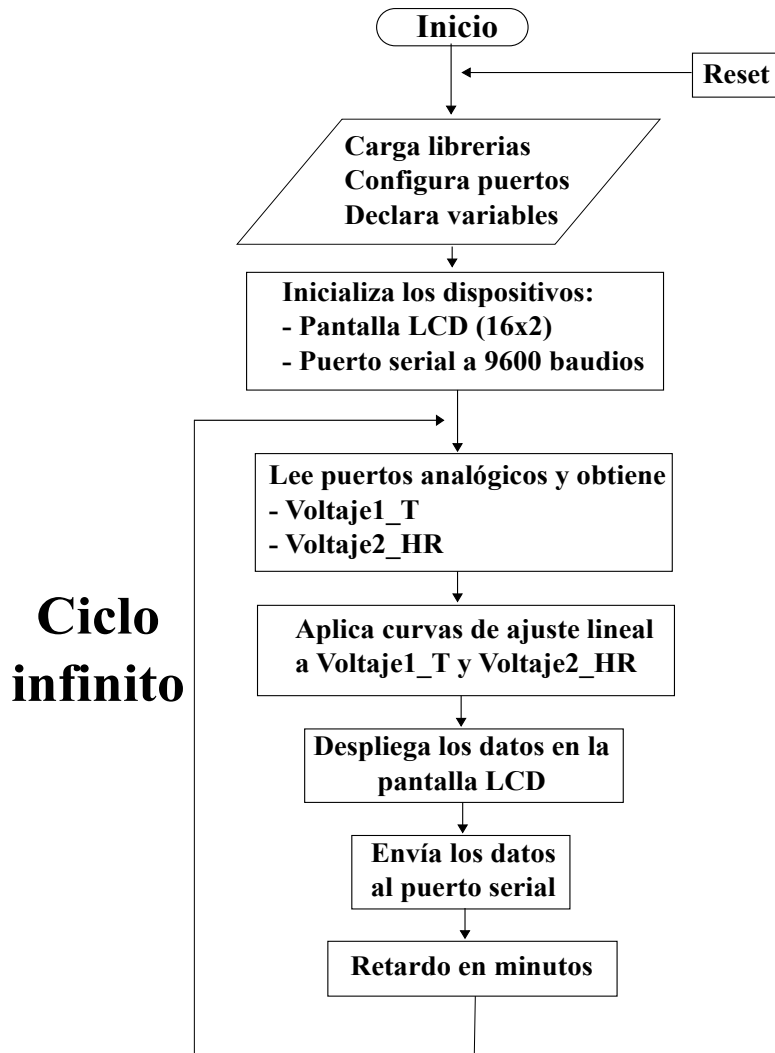


Figura 3.7: Diagrama de flujo del software embebido que contiene el microcontrolador del sistema de instrumentación.

El módulo de servidor web desempeña la tarea de recibir la información de la red inalámbrica de sensores, respaldarla y subirla a internet. Este módulo también se desarrolló dentro del grupo de investigación CACIE. Cabe resaltar, que los experimentos llevados a cabo con el montaje 1, proporcionaron información muy valiosa para optimizar la operación de montajes de medición automatizados que se utilizarán en otros proyectos de investigación del grupo CACIE.

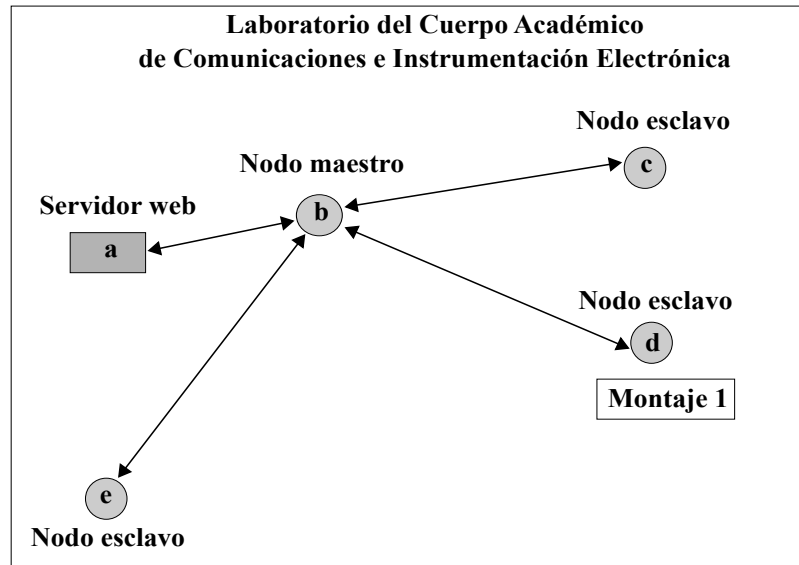


Figura 3.8: Topología de comunicaciones entre los nodos esclavo, el nodo maestro y servidor web.

3.3. Diseño e implementación de algoritmos y funciones para procesamiento digital de imágenes

En esta sección se describen los algoritmos utilizados para los procesos de adquisición automática de imágenes digitales, la función de segmentación en sub-imágenes, la segmentación del chile Habanero, la extracción y cálculo de parámetros de color, el acceso a sub-imágenes y la generación de la matriz de color a partir de los parámetros extraídos de las imágenes. Es importante señalar que los algoritmos que aquí se presentan se desarrollaron tomando en cuenta, desde un punto de vista electrónico, la portabilidad del código. Para esto, se consideró la directriz de generar algoritmos y funciones propias para migrar el código a otras plataformas en sistemas embebidos, por ejemplo: un FPGA (Field Programmable Gate Array), un microcontrolador o a una plataforma de software libre como Python, Android en dispositivos móviles, entre otras. También, se consideró la directriz de mantener los códigos en una forma básica, práctica y sencilla para su rápida interpretación tratando de evitar al máximo la utilización de funciones propietarias de plataformas comerciales. Con el fin de acelerar la implementación de los algoritmos, la programación de las rutinas se realizó en la plataforma MATLAB.

3.3.1. Algoritmo de adquisición automática de imágenes digitales

Este algoritmo dirige el funcionamiento del montaje de adquisición automática de imágenes digitales. La secuencia de operación se muestra en forma de diagrama de flujo en la figura 3.9.

Al iniciar la secuencia del algoritmo se establece la configuración general del sistema y se encienden las etapas tanto de monitoreo como de potencia. Una vez configurado el sistema, el algoritmo procede a dar inicio a la secuencia de adquisición. El algoritmo verifica el registro del RTC y lo compara con el valor del tiempo de muestreo preestablecido, si el registro del RTC es igual al tiempo de muestreo, pasa a la siguiente etapa, en caso contrario regresa a verificar si ya se cumplió el tiempo de muestreo. Si se cumple el tiempo de muestreo, se enciende la lámpara y se mantiene encendida hasta el tiempo preestablecido antes de activar la cámara para adquirir la imagen; si no se cumple el tiempo la cámara se mantiene apagada. Una vez encendida la cámara, se procede a activar el disparo, se lleva a cabo la adquisición de la imagen, se registran los parámetros de T y HR, se almacena la imagen en la memoria de la cámara y se descarga la imagen a la computadora. Posteriormente, la información es enviada a un servidor web, en donde es almacenada y una vez que concluye el envío de la información se inicia de nuevo el proceso de adquisición, como se muestra en la figura 3.9.

3.3.2. Algoritmo de segmentación por área para la generación de las sub-imágenes

A diferencia del montaje preeliminar, en donde se procesaban imágenes individuales de cada muestra, en el montaje de adquisición automática de imágenes digitales se procesa una sola imagen que contiene a todos los ejemplares involucrados en el experimento. Es por eso que se requiere de un algoritmo para cargar la base de datos con las imágenes y una función que realice la segmentación de las sub-imágenes correspondientes a los ejemplares de chile Habanero presentes en la imagen. Esta segmentación se realiza delimitando el área de interés, en donde se encuentra la información correspondiente al ejemplar muestra, además de ligar esta información con la hora en que la imagen fue adquirida, el diagrama de flujo de este algoritmo se muestra en la figura 3.10.

El diagrama de flujo de la figura 3.10 tiene la secuencia siguiente: en primer lugar se extraen las dimensiones de la imagen; una vez que se obtienen las dimensiones calcula la cantidad de segmentos en que se divide la imagen total sobre el eje x , la cual se expresa por el término pasos_x y corresponde a la operación de dividir el número total de píxeles del eje x (largo) entre el número total de ejemplares por columna. De igual forma calcula la cantidad de segmentos en que se divide la imagen total sobre el eje y , expresada por el término pasos_y , que a su vez corresponde al resultado de la división del número total de píxeles del eje y (ancho) entre el número total de filas. Posteriormente el algoritmo asigna las coordenadas de cada región de interés para realizar la

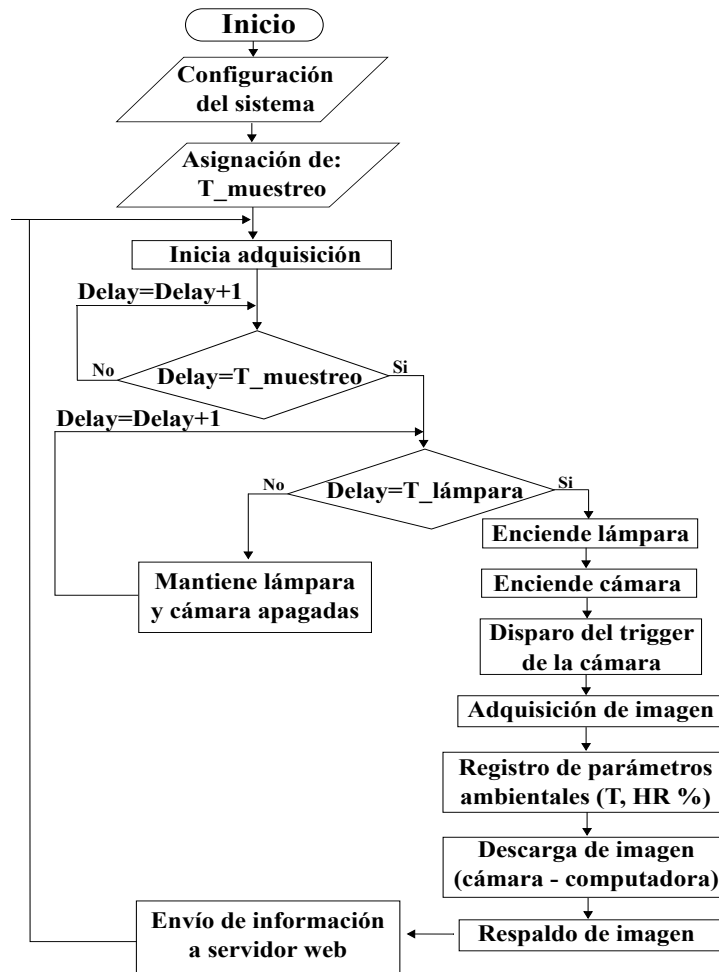


Figura 3.9: Diagrama de flujo del algoritmo para la adquisición automática de imágenes digitales.

extracción de una imagen por cada fruto y se designa un nombre (etiqueta) de archivo por cada ejemplar. Con los ejemplares segmentados y etiquetados apropiadamente accesa al directorio /SUBIMAGENES/ para almacenar las sub-imágenes. Una vez en el directorio se verifica si la cantidad de archivos almacenados corresponde al número total de ejemplares ($N_{\text{ejemplares}}$). Si el número de archivos almacenados no corresponde al número total de ejemplares, continúa el proceso de etiquetado y almacenaje en forma secuencial hasta alcanzar el número total de ejemplares. Finalmente, si se cumple la condición del número de archivos almacenados, se cambia la trayectoria de trabajo al directorio /MUESTRAS/ y se concluye la rutina.

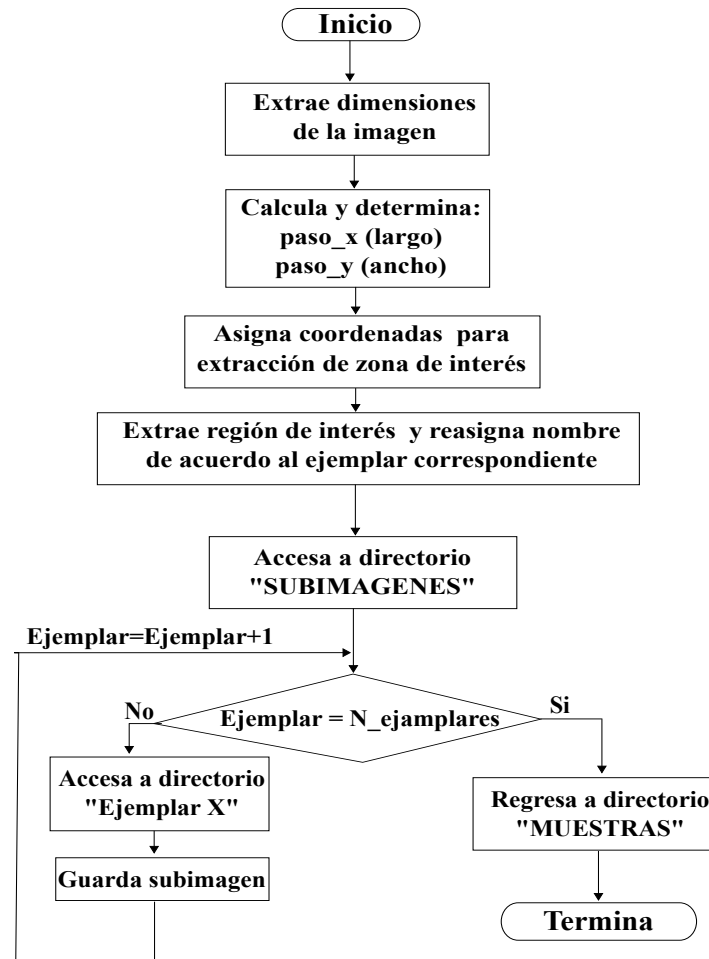


Figura 3.10: Diagrama de flujo del algoritmo para la generación de las sub-imágenes.

3.3.3. Algoritmo de segmentación del chile Habanero

Este algoritmo establece las tareas para segmentar imágenes correspondientes a cada ejemplar de chile Habanero, tomando como referencia tanto el color del fruto como del fondo de la imagen original. Cabe resaltar que éste procedimiento funciona de forma independiente al tipo de imagen utilizada, es decir, que opera de la misma manera para una imagen individual obtenida con el montaje manual que para la sub-imagen obtenida con el montaje automático.

La figura 3.11, muestra el diagrama de flujo de la secuencia del algoritmo para la segmentación de la imagen de cada chile Habanero a partir de la imagen original cuyo archivo se encuentra en el directorio de almacenamiento y es accesado por el algoritmo. Al iniciar la secuencia se carga la imagen original (codificada en el espacio de color RGB); a continuación se extraen las dimensiones $[M, N, O]$ e inicializa en uno las variables i y j que se utilizan como índices de filas y columnas para determinar coordenadas

dentro de la imagen y desplazarse a través de ella. Posteriormente el algoritmo entra en un ciclo, en donde consulta si las filas (i) han alcanzado su valor máximo (M). Si se cumple la condición se entrega la imagen codificada en el mismo espacio de color RGB; si no cumple la condición continua realizando el barrido de las columnas (j) en la fila correspondiente (i) hasta que alcance su valor máximo (N). Si el índice de columnas (j) cumple la condición de llegar al máximo, incrementa el valor del índice de filas (i) y regresa a consultar si cumple la condición del valor máximo de las columnas. Si el índice de columnas no cumple la condición de valor máximo, procede a aplicar la función tono, la cual utiliza los valores de las coordenadas (i, j) correspondientes a la fila y columna para acceder a cada uno de los canales R (1), G (2) y B (3) de la imagen original y extraer la información de color para compararla con el umbral preestablecido que corresponde al color del fondo. Si se cumple la condición de umbral y la información es diferente del fondo el algoritmo procede a extraer el valor de color y guardar las coordenadas de ese pixel e incrementa en uno el valor de la columna (j); si no se cumple la condición se le asigna un valor igual a cero a los pixeles correspondientes a las coordenadas (i, j) e incrementa el valor de la columna (j) para continuar el barrido de la imagen.

3.3.4. Algoritmo para la extracción y cálculo de parámetros de color

Después de llevar a cabo la segmentación de la imagen original RGB se procede a realizar la conversión al espacio de color CIELAB y la extracción de los parámetros de color L^* , a^* y b^* . Con los parámetros extraídos se calculan los valores de croma y ángulo de tono a partir de las componentes a^* y b^* .

El diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.12, representa la secuencia del algoritmo para extracción de color. La imagen_segmentada_RGB al ser cargada se convierte del espacio de color RGB al espacio de color CIELAB. Una vez que se realiza la conversión de espacios de color, se procede a encontrar los pixeles de interés, cabe recordar que dichos pixeles fueron proporcionados por el algoritmo para la segmentación del chile Habanero. Posteriormente se calcula el valor promedio de cada una de las componentes (L^* , a^* y b^*); una vez obtenidos los valores de los componentes a^* y b^* , se procede a calcular el valor de croma por medio de la fórmula 2.4; finalmente se calcula el ángulo de tono por medio de la fórmula 2.5. El ajuste del valor del ángulo de tono se determina por medio del cuadrante en el que se encuentra, es decir, a partir los valores positivos o negativos de a^* y b^* . Una vez extraídos los parámetros, se realiza el cálculo del valor promedio para finalmente almacenar de forma ordenada los parámetros de color.

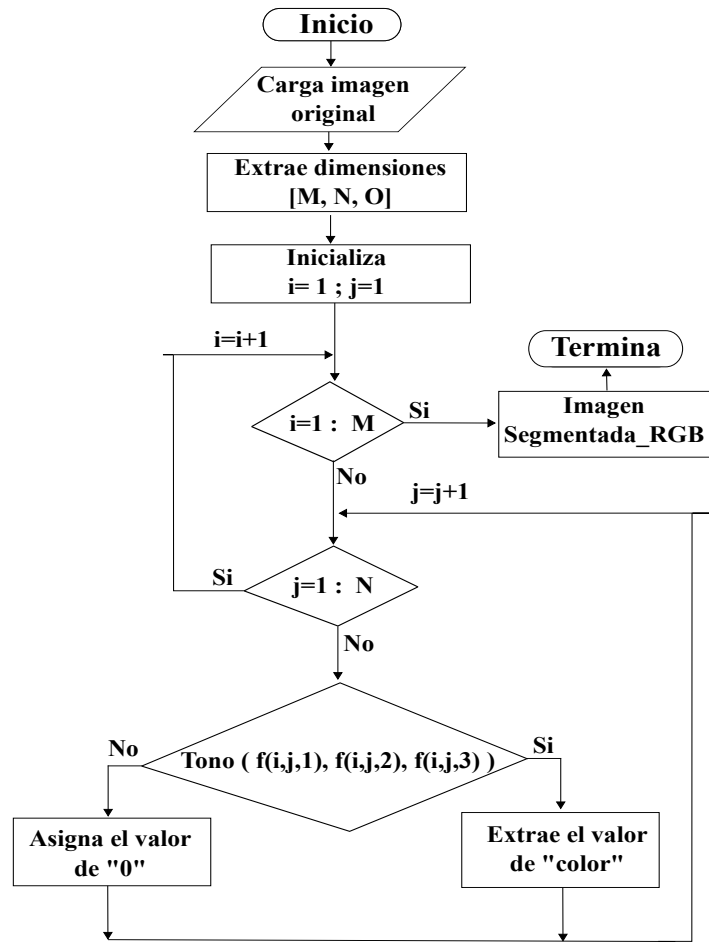


Figura 3.11: Diagrama de flujo del algoritmo para segmentación de chile Habanero.

3.3.5. Algoritmo para el acceso y procesamiento de las imágenes de la base de datos

El montaje de adquisición automática de imágenes digitales genera una base de datos con imágenes que contienen la información de la evolución de color del chile Habanero con respecto al tiempo, las cuales deben de ser procesadas para extraer la información de color y, llevar a cabo, su análisis.

La tarea de extracción de la información de color se realiza de una forma práctica, ya que, se propuso etiquetar de acuerdo a la hora y día en que fueron adquiridas las imágenes, esto simplifica la tarea y contribuye a la rápida identificación de la información que se desee analizar. El proceso se lleva a cabo en dos partes, primero se generan las sub-imágenes de cada uno de los ejemplares y, posteriormente, apoyado del algoritmo descrito en la sección 3.3.6 se genera la matriz de color; esto se origina

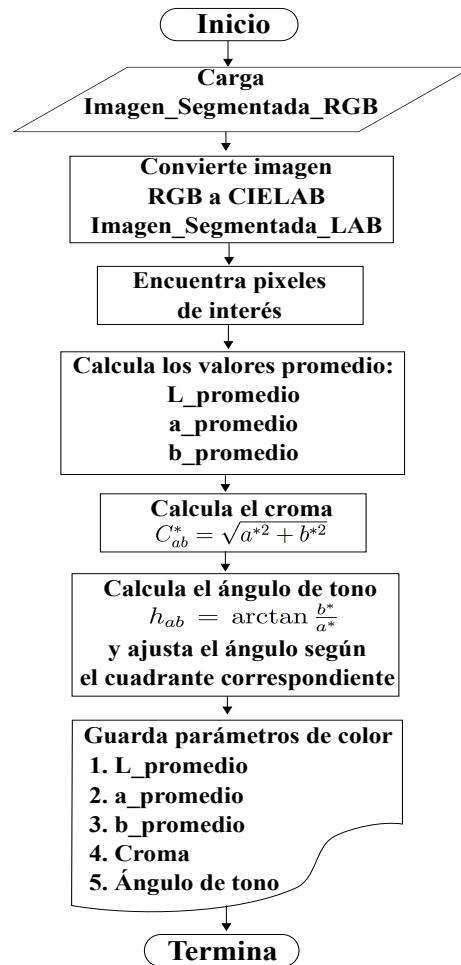


Figura 3.12: Diagrama de flujo del algoritmo para extracción y cálculo de parámetros de color.

por el hecho de que las imágenes de los experimentos requieren de ser convertidas de un formato RAW (crudo) a un formato TIF para ser procesadas con estos algoritmos. Por otro lado, las imágenes se almacenan por día y cada día se etiquetan por hora; es decir, el día 1 contiene el total de horas de muestreo (N_horas), que para este caso de estudio fue de 24 imágenes, etiquetadas secuencialmente del 1 al 24, el día 2, de igual manera, contiene las siguientes 24 imágenes y así sucesivamente hasta llegar al día final del experimento (N_días).

El diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.13 representa la secuencia del algoritmo para llevar a cabo el acceso y procesamiento de las imágenes de la base de datos. Al inicio del algoritmo se configuran las variables, los directorios y se solicitan los valores correspondientes al total de días (N_días) y el total de horas de muestreo (N_horas); cambia la trayectoria de acceso al directorio /MUESTRAS/DIA/, que con-

tiene el total de las imágenes adquiridas (N_días) según el experimento; después ingresa al directorio llamado /DÍA/, que contiene las N_horas de imágenes del día de muestreo; ubicado en el directorio correspondiente al día uno y a la hora uno, y carga la imagen. Posteriormente el algoritmo aplica la función sub-imagen, descrita en la sección 3.3.2; luego consulta si Hora cumple la condición de haber llegado al número total de horas (N_horas), si la cumple incrementa en uno el valor de Día, si no incrementa en uno el valor de Hora y se regresa a cargar la siguiente imagen correspondiente a la hora actual. Una vez que se alcanza al valor total de las horas de muestreo se procede a consultar la siguiente condición que corresponde a si Día ha llegado al número total de días de muestreo, si se cumple la condición despliega el tiempo de procesamiento y termina, si no incrementa en uno el valor de Día y se regresa al directorio /MUESTRAS/.

3.3.6. Algoritmo para la generación de la matriz de color

El algoritmo descrito en la sección 3.3.5 genera las sub-imágenes a partir de una segmentación por regiones y las guarda en el directorio /SUBIMAGENES/, donde el total de carpetas equivale al número total de ejemplares (N_ejemplares) y, a su vez, dentro de cada carpeta del ejemplar correspondiente se tienen las sub-imágenes de acuerdo al número total de horas de muestreo (N_horas).

En la figura 3.14 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo para la generación de la matriz con los parámetros de color. El algoritmo tiene la siguiente secuencia: en su inicio configura los directorios y se solicita la asignación de los valores del número total de horas de muestreo (N_horas) y el número total de ejemplares (N_ejemplares). Una vez asignados los valores accesa al directorio /SUBIMAGENES/; consulta si el índice Ejemplar ha llegado al valor máximo dado por N_ejemplares, si cumple la condición despliega el tiempo de procesamiento y termina; si no accesa al directorio correspondiente al ejemplar actual. Ubicado en el directorio del ejemplar actual, consulta si Hora ha llegado a su máximo valor N_horas, si cumple la condición accesa al directorio /COLOR/ y guarda la matriz de color e incrementa en uno el valor de Ejemplar y regresa al directorio /SUBIMAGENES/ a consultar si la condición se cumple; si no carga la sub-imagen correspondiente a la hora actual, aplica la función Segmenta_Habanero, aplica la función para la extracción de parámetros de color, genera la matriz de color, incrementa en uno el valor de Hora y regresa a consultar si la condición se cumple.

Una vez que inicia el algoritmo la secuencia se lleva a cabo de forma automática durante el tiempo que requiera el procesamiento; considerando la dimensión de la matriz de cada ejemplar como N_horas x componentes de color ($L_{promedio}^*$, $a_{promedio}^*$, $b_{promedio}^*$, C_{ab}^* y h_{ab}); por ejemplo, si se toma en cuenta un experimento de N_horas=600 horas y las 5 componentes de color, se tendría una matriz de color de 3,000 datos por ejemplar. Con base en la matriz que contiene los parámetros de color (en el espacio de color CIELAB), los datos extraídos de los parámetros medidos se presentaran en el capítulo 4 en forma de diagramas de color a partir de las componentes a^* y b^* . La figura 3.15 muestra la evolución natural de color de los chiles Habaneros por medio de un diagrama de regiones de color por etapa de maduración en el espacio CIELAB; en donde el punto

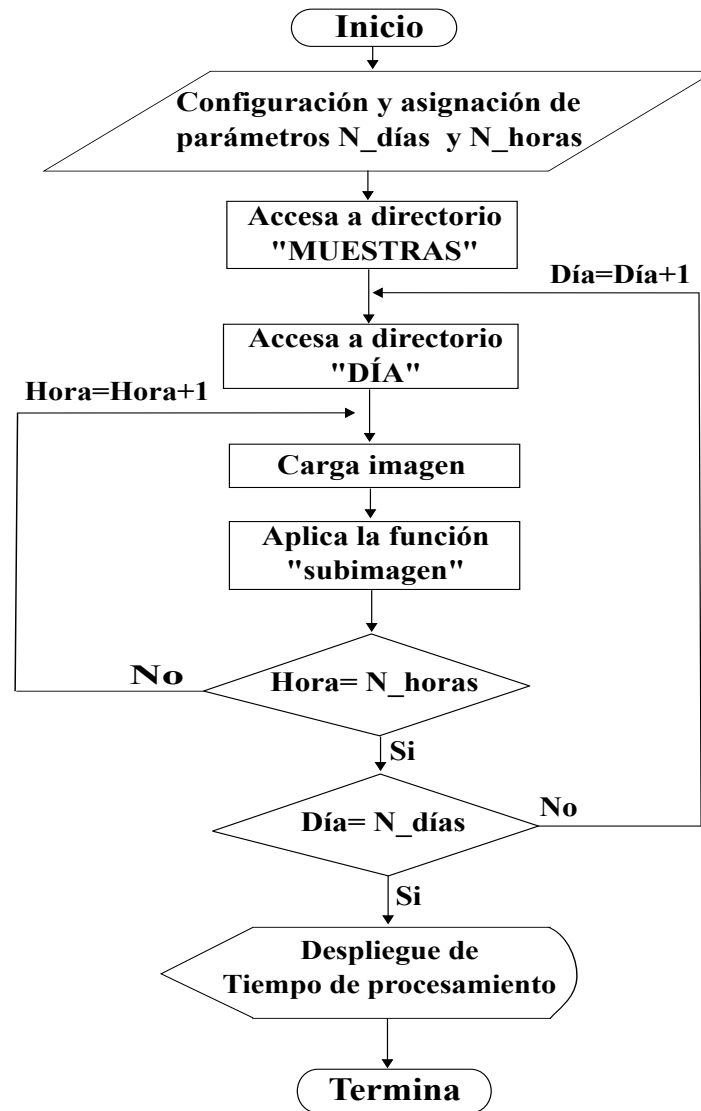


Figura 3.13: Diagrama de flujo del algoritmo para el acceso y procesamiento de las imágenes de la base de datos

P que inicia en una región llamada inmaduros (que corresponde a los tonos verdes) y se desplaza a través de los tonos amarillos (región llamada rayados) hasta terminar en un punto Q que se encuentra en la región llamada maduros (que corresponde a los tonos naranjas). Las regiones de etapas de maduración se encuentran limitadas por dos umbrales uno en 120° y otro en 60° , como se puede observar en la figura 3.15. Las muestras que se encuentran entre 120° y 140° se consideran verdes (inmaduros), para valores entre 120° y 60° se consideran rayados (amarillos) y para valores entre 60° y 50° se consideran maduros (naranjas). Es importante tener en cuenta la figura 3.15 para la

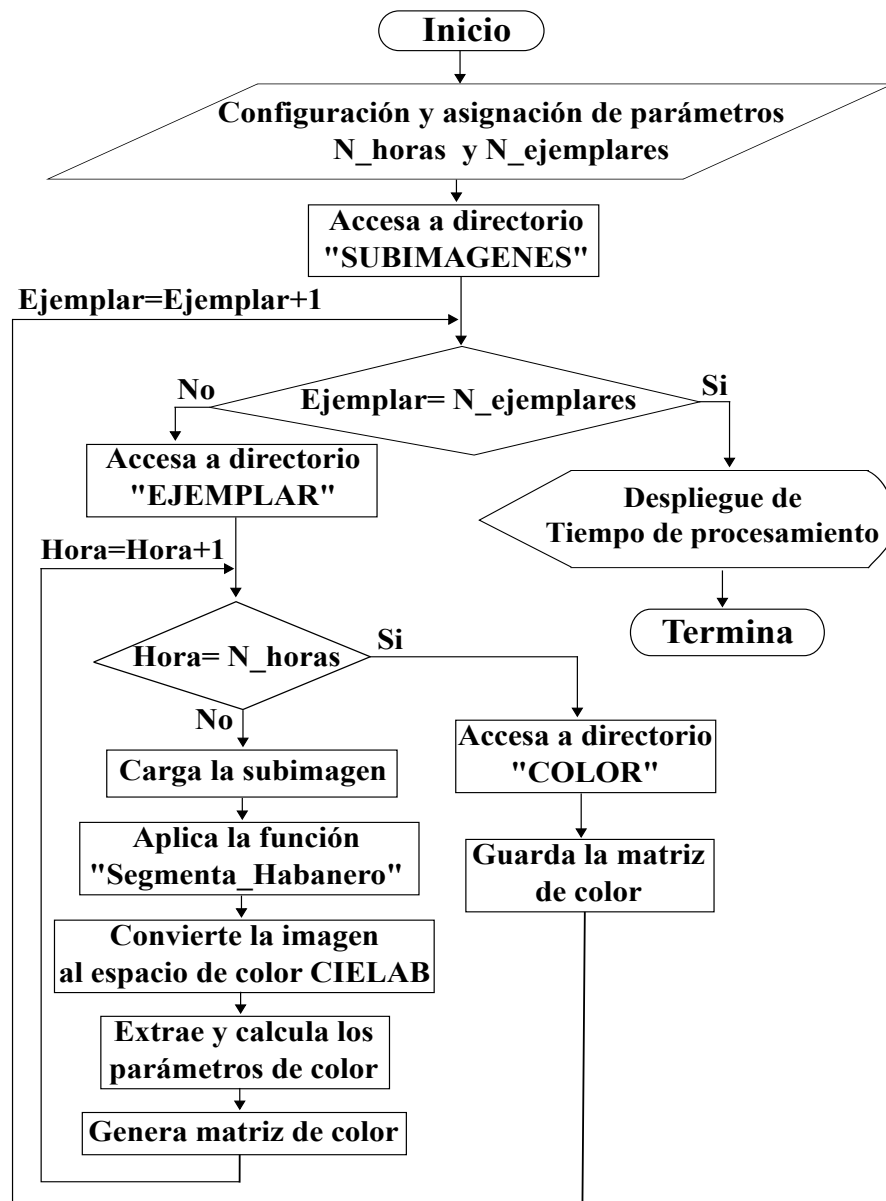


Figura 3.14: Diagrama de flujo del algoritmo para la generación de la matriz con los parámetros de color.

interpretación de los resultados que se presentarán en el siguiente capítulo.

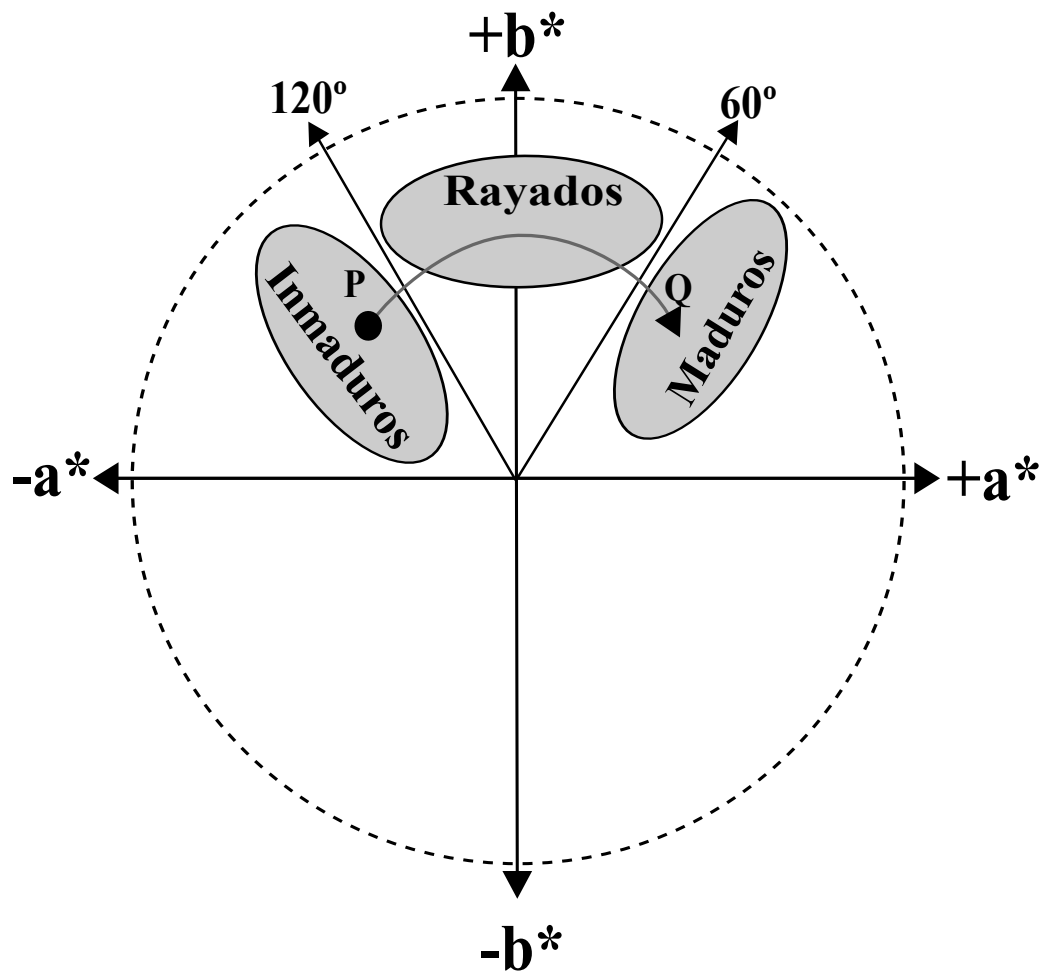


Figura 3.15: Diagrama de color a^*-b^* descriptivo de la información generada a partir de la matriz de color.

3.4. Colaboración científica con la Universidad de Sevilla

Durante la estancia en el Laboratorio de Color y Calidad de Alimentos de la Universidad de Sevilla, se me permitió participar en un proyecto, en el cual tuve la oportunidad de trabajar con ejemplares de uva de la Denominación de Origen Calificada (DOCa) Rioja de España. Esto para cubrir el principal objetivo de la estancia, que se planteó como: la introducción al análisis químico del color. También, como parte de la colaboración en la área de ingeniería electrónica aplicada al color y la calidad de alimentos, se planteó la opción desarrollar un dispositivo electrónico capaz de medir el color por medio de un sensor RGB, con el objetivo de proporcionar una introducción en el área de electrónica para los colegas dentro del grupo de investigación y como valor agregado contar personal capacitado y familiarizado con la terminología básica en las áreas de interés para los dos grupos.

En las secciones 3.4.1 y 3.4.2 se describen los proyectos Uvas de la Rioja y Colorímetro, respectivamente. El proyecto: Uvas de la Rioja involucra la adquisición de imágenes hiperespectrales en el infrarrojo cercano (NIRS) y en el espectro visible. La preparación de las muestras para la extracción de los compuestos químicos que pigmentan los hollejos de las uvas. La técnica de cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC, por sus siglas en inglés) para la obtención de los cromatogramas e identificación de los compuestos químicos y sus proporciones presentes en la muestras. La realización de cálculos y análisis de datos para la determinación de la correlación de los pigmentos (antoncianos) con el color en dos puntos de madurez distintos para uvas individuales de la DOCa Rioja.

3.4.1. Proyecto: Uvas de la Rioja

La DOCa Rioja es una región de España que por sus diversidad orográfica y climática dispone de tres sub-zonas de producción: Rioja Alta, Rioja Baja y Rioja Alavesa, donde se originan vinos con particulares características. Para este caso de estudio se tuvo la oportunidad de trabajar con muestras de uvas de la sub-zona Rioja Alta, donde se tomaron los ejemplares en dos estados de madurez distintos (madurez y post-madurez) y se separaron en granos individuales de uva de cuatro variedades, durante su cosecha en el año 2012 y, para evitar su degradación, se mantuvieron congeladas a -20° centígrados.

En la figura 3.16 se muestra la metodología utilizada para la realización del proyecto uvas de la Rioja. La metodología inicia con la descongelación de las muestras; posteriormente se procede a llevar a cabo la adquisición de las imágenes individuales a color y las imágenes hiperespectrales en NIR. Posteriormente se realiza la separación de los hollejos de cada uva y se preparan las muestras para la extracción de antocianos. Una vez extraídos los antocianos, se prepararon los viales para su inyección en el HPLC. Se procesaron las imágenes (visible y NIR), los cromatogramas; y por último, se realizó la interpretación de los resultados, que se muestran en la sección del capítulo 4 que corresponde a los resultados. A continuación se describen cada una de las etapas

y los procedimientos utilizados en la metodología descrita previamente.

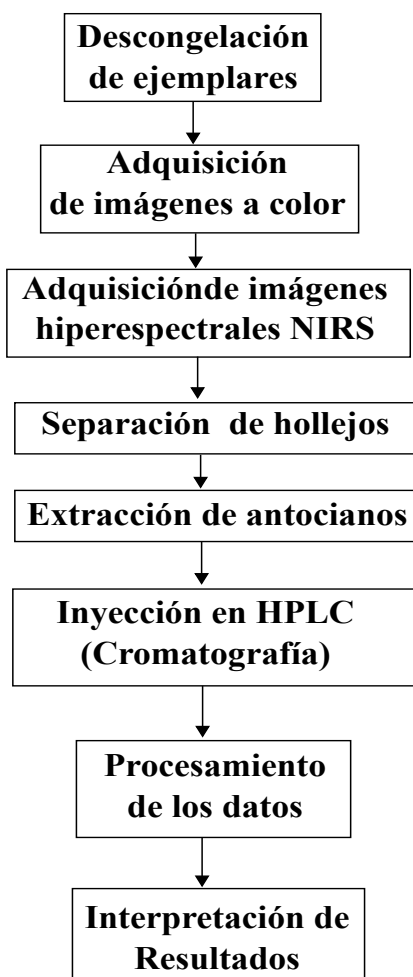


Figura 3.16: Metodología utilizada para realizar proyecto uvas de la Rioja.

Muestras

Las muestras para estos experimentos corresponden a ejemplares de la región de la DOCa Rioja en su sub-zona denominada Rioja Alta. Se cosecharon en dos puntos de muestreo madurez (D) y post-madurez (E) de acuerdo a sus etapa de madurez, durante el mes de octubre de 2012. Del lote general del muestreo se eligió utilizar 25 ejemplares por cada fase de madurez que proporcionan un total de 50 muestras.

Las variedades seleccionadas fueron etiquetadas con los siguientes nombres de acuerdo a su variedad y origen: Tempranillo, Tira Agustín (TJTA); Tempranillo, Corral Peñolía (TJCP); Graciano (GRP); Garnacha (GAP) y Mazuelo (MZP).

Adquisición de imágenes en el espectro visible

En esta etapa, a diferencia de los montajes descritos en la sección 3.2, se utilizó un sistema comercial llamado DigiEye, que se muestra en la figura 3.17. Este sistema incluye los siguientes elementos: una cabina aislada con iluminación controlada y configurable (en modo difusa o directa), una cámara digital, una computadora con el software que proporciona el fabricante; también incluye una tablilla con recuadros de colores que se utiliza durante el proceso de calibración.

Una vez realizadas las recomendaciones y procedimientos de calibración del sistema, se procedió a la adquisición de la imagen digital de cada uno de los granos de uva; que para este caso de estudio correspondía a 50 imágenes digitales de los ejemplares. Las imágenes, posteriormente, fueron procesadas por el software propietario DigiFood, que realiza la segmentación y extracción de información de color en el espacio de color CIELAB.

DigiEye



VeriVide
See in Truth

Figura 3.17: Sistema de adquisición de imágenes DigiEye.

Adquisición de imágenes hiperespectrales NIR

La figura 3.18 se muestran los elementos principales del sistema de adquisición de imágenes hiperespectrales (Infaimon S.L., Barcelona, España) que eran la fuente de iluminación, la óptica (escáner de espejo y la lente), un espectrógrafo, la cámara y la

computadora utilizados para la adquisición de las imágenes hiperespectrales. El sistema comprende una cámara (320 x 256 pixeles; Xenics[®] XEVA-USB InGaAs; Xenincs Infrared Solutions, Inc. Leuven, Bélgica), un espectrógrafo (Specim ImSpector N17E Enhanced; Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finlandia) que cubre el rango espectral entre 900 y 1700 nm (resolución espectral de 3.25 nm), dos lámparas halógenas de tungsteno de yodo de 70 W (Prilux[®], Barcelona, España) montadas como fuente de iluminación, un escáner de espejos (Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finlandia) y una computadora. Las imágenes hiperespectrales fueron adquiridas con una frecuencia de imagen de 50 Hz y un tiempo de exposición de 9 ms utilizando el software de adquisición SpectralDAQ v. 3.62 (Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finlandia) [4].

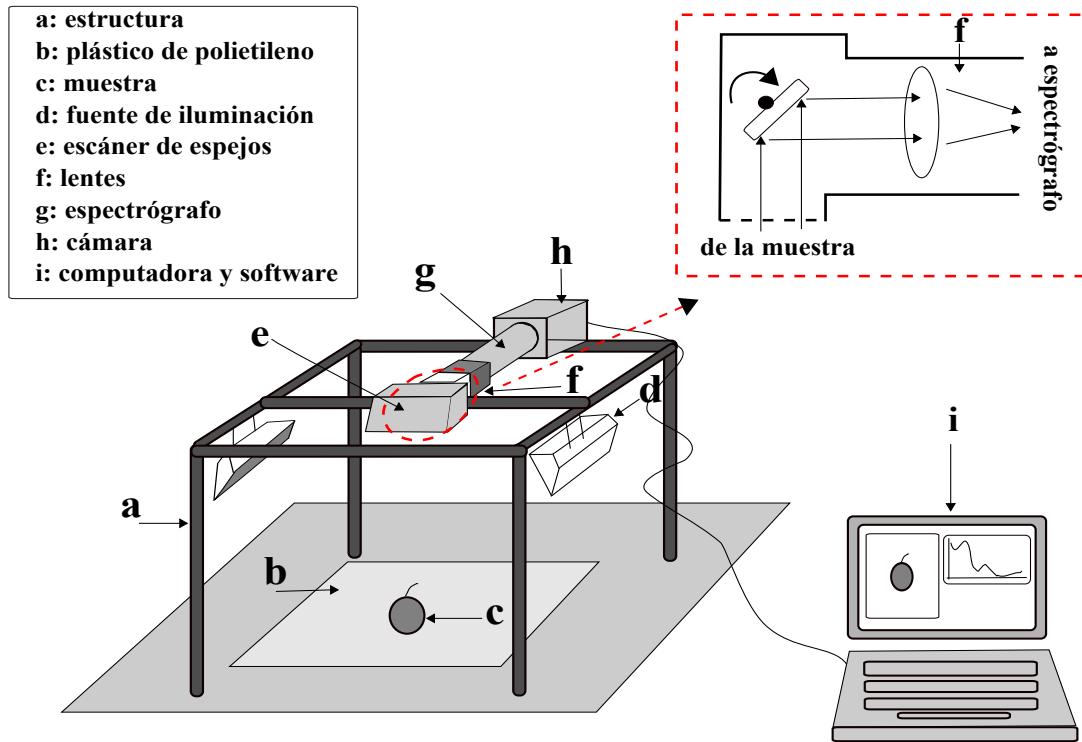


Figura 3.18: Diagrama de sistema de adquisición de imágenes hiperespectrales en cercano a infrarrojo [4].

Se utilizaron dos puntos de calibración en reflectancia. Como blanco de referencia se utilizó una tira de cerámica Spectralon[®] (Labsphere Inc., North Sutton, USA) mientras que la corriente oscura se registró mediante la adopción de una medición después de cubrir el objetivo espectrógrafo con una taza y cerrar el obturador. Los valores de reflectancia corregida (R) se calcularon teniendo en cuenta la relación entre la muestra (S), el estándar blanco (W) y la corriente oscura (D) con señales de intensidad absoluta, utilizando la fórmula 3.1.

$$R = \left[\frac{(S - D)}{(W - D)} \right] \quad (3.1)$$

Después de esto, las muestras se descongelaron, y templaron a temperatura ambiente y se registraron las imágenes hiperespectrales de las uvas individuales colocadas en un plástico de polietileno. El perfil espectral característico de esta superficie era útil en el proceso de segmentación para el reconocimiento de la región de interés. Las bandas de ondas ruidosas en ambos extremos del rango de espectros fueron retirados y sólo los datos espectrales en las regiones de longitud de onda que resultaron eficaces a 950–1650 nm fueron utilizados en el análisis de datos debido a la reducción de la eficiencia fuera de este rango en el dispositivo utilizado.

Extracción de antocianos y análisis por cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC)

El laboratorio de Color y Calidad de Alimentos cuenta con una extensa variedad de metodologías y procedimientos que consideran los estándares utilizados en la industria de los alimentos, así como protocolos desarrollados por el propio grupo para los diferentes proyectos en los que se encuentran involucrados. Para este caso de estudio y, debido a mi condición de colaborador en el proyecto, se dio seguimiento a la metodología para la extracción de antocianos en hollejos de uva, la cual se describe a continuación.

Una vez adquiridas las imágenes digitales se realizó el procedimiento siguiente: se separó el hollejo de cada uva; se pesó el tubo falcon de 15 ml vacío y con el hollejo; se utilizó como diluyente metanol ácido. Las muestras se homogeneizaron en ultrasonido durante un período de 30 min; se dejaron macerando a -20° centígrados. Las muestras se centrifugaron a 3000 rpm por un período de 15 minutos. Las muestras se evaporaron y se volvieron a diluir en 350 ml de agua ácida y se enrasó en matraz de 1 ml.

Posteriormente, se prepararon los viales con 350 μ l. Se configuró el HPLC con el método para identificación de antocianos. Se inyectó en el HPLC 100 μ l de muestra por duplicado. Una vez obtenidos los cromatogramas, se procedió a la integración de las áreas de cada pico, según el compuesto que corresponde al tiempo de aparición estipulado en el método de separación.

3.4.2. Proyecto: Colorímetro

El proyecto colorímetro trata sobre la implementación e integración de un sistema electrónico para la medición e identificación de color en el espacio de color RGB, el cual, se constituye de los siguientes elementos: un sensor RGB, la plataforma Arduino y software embebido. Esto se llevó a cabo para brindar la introducción a los colegas del grupo en el área de electrónica, lo cual se planteó como objetivo dentro del plan de trabajo durante la estancia de investigación.

Instrumentación electrónica de sensor RGB TCS3200

La instrumentación electrónica del sensor RGB (TCS3200) se realizó por medio de software, debido a que éste sensor entrega la información en forma de señal digital el diseño de hardware se redujo. Por otro lado, fue necesario utilizar una base de montaje de 8 pines, para realizar las pruebas con el sensor ya que su encapsulado es del tipo SOIC (para montaje superficial).

En la figura 3.19 se muestra el diagrama del sensor RGB. En donde los pines (del 1 al 8) corresponden a las siguientes funciones: (1 y 2) S0 y S1 pines de entrada para la selección de la escala de frecuencia de salida; (3) pin que habilita para f_0 (se activa en bajo); (4) pin de tierra, todos los voltajes deben de estar referenciados a GND; (5) pin para energizar el sensor, voltaje de alimentación +5VDC; (6) frecuencia de salida f_0 ; (7 y 8) pines de entrada para la selección de tipo de fotodiodo.

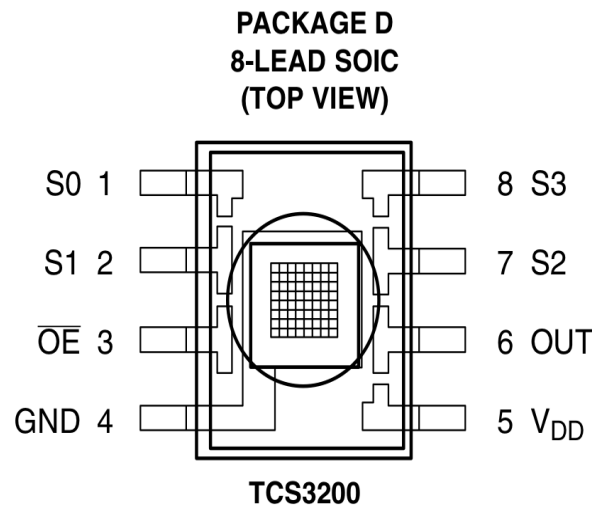


Figura 3.19: Sensor RGB TCS3200.

Desarrollo e implementación software embebido del sistema

El sensor se conecta a la plataforma Arduino, en donde, por medio del software embebido el sistema controla al sensor y despliega la información medida en una pantalla de LCD. El algoritmo del sistema colorímetro que se muestra en el diagrama de flujo de la figura 3.20 describe la secuencia de operación del sistema.

Al iniciar la secuencia, el algoritmo carga las librerías, configura los puertos y declara las variables. Posteriormente, el algoritmo inicializa la pantalla LCD de (16 columnas por 2 renglones), configura el puerto serial para que opere a una tasa de transmisión de 9600 bauds. Después, el software entra en un ciclo infinito, donde se llevan a cabo

las tareas que realizará el algoritmo de forma indefinida y dependiendo de las condiciones que se cumplan en la secuencia, como aplicar un “reset” o se quede sin energía el módulo, la secuencia se reinicie a las condiciones iniciales. Las tareas asignadas en este algoritmo son: habilitar el sensor RGB, aplicar la función canal_frecuencias, la cual se encarga de la controlar la secuencia de selección y adquisición de la señales en cada uno de los canales; aplicar la función despliega_datos, la cual se encarga de enviar la información a la pantalla LCD y visualizar la las lecturas del sensor; aplicar la función Comparación_color, la cual se encarga de comparar la señal actual con valores de color preestablecidos; aplica un retardo de refresco, para que el sistema actualice los datos.

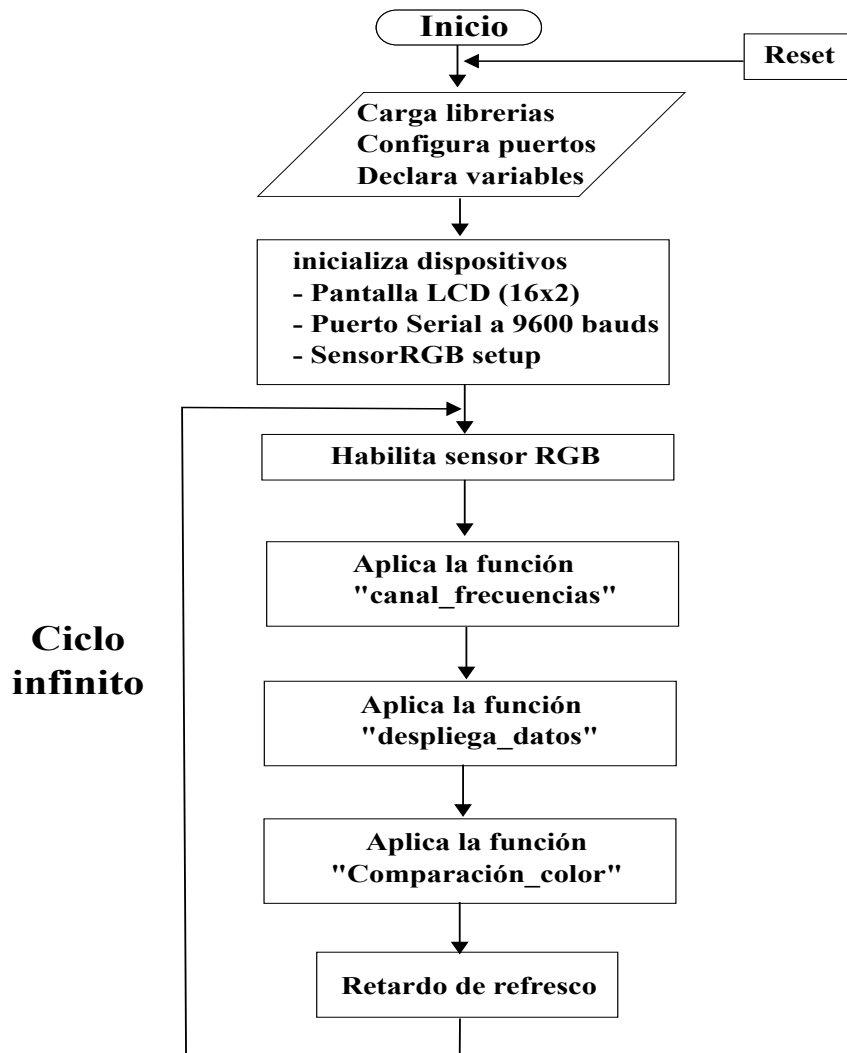


Figura 3.20: Diagrama de flujo del algoritmo del sistema colorímetro.

Capítulo 4

Pruebas y Resultados

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los experimentos realizados con los montajes y algoritmos descritos en el capítulo anterior. Los resultados se distribuyen de la siguiente forma: la evolución de color de cada una de las variedades (Jaguar y Mayan K'iin) del experimento 1 (mayo 2012), el experimento 2 (junio 2013) y el experimento 3 (agosto 2013), respectivamente; a continuación el experimento 4, que describe los resultados del proyecto uvas de la Rioja; posteriormente la implementación 1, que presenta el desarrollo de la red inalámbrica de sensores; y, por último, la implementación 2, que describe el desarrollo del colorímetro.

La información de color se analiza en el espacio CIELAB. Para los primeros tres experimentos se presentan los datos con la siguiente secuencia: primero se muestra el diagrama de color a^*-b^* con la nube de puntos correspondientes al total de los ejemplares. En el caso del montaje manual se presentan los tres grupos de madurez (verdes, rayados y maduros) y en el caso del montaje automático se muestran los valores promedio por día de cada ejemplar. A continuación, se presentan los valores promedio de la componente L^* por día de la evolución de color y posteriormente se muestran los diagramas de color a^*-b^* en donde se representan los valores promedio de la evolución de color, para el experimento 1 se muestran los tres estados de madurez. Se presentan los valores promedio del croma C_{ab}^* promedio durante la evolución de color; y por último, se presentan los valores promedio del ángulo de tono h_{ab} promedio durante la evolución de color, para el experimento 1 se muestran los datos de los tres grupos de madurez.

Por otra parte, los resultados obtenidos del experimento 4, que se refiere al proyecto uvas de la Rioja, se presentan con la siguiente secuencia: el análisis de imágenes en el espectro visible; posteriormente, el análisis de imágenes hiperespectrales NIRS y por último, el análisis de antocianos.

Los resultados obtenidos de las mediciones realizadas con las implementaciones electrónicas (1 y 2) se presentan en tablas, que contienen los valores promedio de los datos de T y HR, de la red inalámbrica de sensores y los valores de calibración de color del colorímetro.

4.2. Experimento 1: chile Habanero de la variedad Jaguar, mayo 2012

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento digital de las imágenes de chiles Habaneros de la variedad Jaguar durante su post-cosecha. En la sección 4.2.1 y sección 4.2.2 se describe la metodología utilizada para este experimento y los resultados obtenidos, respectivamente.

Los datos de color se presentan en el espacio CIELAB, en la siguiente secuencia: se presenta el diagrama de color a^*-b^* con la nube de puntos del total de los valores de color extraídos de las imágenes de los ejemplares en los tres grupos de madurez (verdes, rayados y maduros); posteriormente, la gráfica de la componente L^* con respecto al tiempo de los tres grupos de madurez; a continuación, se presenta el diagrama de color a^*-b^* promedio de los tres grupos de madurez; posteriormente se muestra la gráfica de croma (C_{ab}^*) con respecto al tiempo de los tres grupos de madurez; y, por último, se presenta la evolución del ángulo de tono (h_{ab}) con respecto al tiempo.

4.2.1. Metodología del experimento 1

La metodología utilizada para este experimento se desarrolló de la siguiente manera: se cosecharon los ejemplares de chile Habanero del invernadero, en el Departamento de Acuicultura de CICESE. Los cuales se trasladaron al laboratorio del grupo de investigación CACIE; donde, se distribuyeron las muestras en el montaje 1. Posteriormente, se procedió a realizar la adquisición de las imágenes individuales de los ejemplares cada veinticuatro horas durante quince días. Una vez adquiridas las imágenes y generada la base de datos de los ejemplares, se aplicaron los algoritmos de procesamiento digital imágenes, para extraer los parámetros de color; y, por último, se analizó la información de color en el espacio CIELAB.

Muestras del experimento 1

Las muestras utilizadas para el desarrollo de este experimento son de chile Habanero de la variedad Jaguar, cultivadas en condiciones acuapónicas en el invernadero del grupo de Diseño y Desarrollo de Tecnología Acuícola en el Departamento de Acuicultura de CICESE, cuyo procedimiento fue implementado por Góngora et al. [98].

Para este experimento, el día miércoles 16 de mayo de 2012, se cosecharon 60 ejemplares de chile Habanero variedad Jaguar en forma aleatoria y posteriormente se clasificaron en tres distintos estados de madurez (verdes, rayados y maduros) y se agruparon de la siguiente manera: 20 ejemplares verdes, 20 rayados y 20 ejemplares maduros.

Adquisición manual de imágenes del experimento 1, utilizando el montaje 1

Una vez cosechados los ejemplares se trasladaron al laboratorio del grupo de investigación CACIE. El sistema de visión por computadora del montaje 1 (descrito en la sección 3.2.1) se utilizó para llevar a cabo la adquisición de la evolución de color por medio de imágenes digitales. La adquisición por ser en modalidad manual, se propuso para adquirir una imagen individual cada veinticuatro horas durante quince días. La red inalámbrica de sensores simultáneamente registraba la información de T y HR del laboratorio. El experimento con 60 ejemplares y una duración de 15 días, con un tasa de muestreo de una imagen cada veinticuatro dio como resultado 900 imágenes digitales.

Un ejemplo de las imágenes generadas durante este experimento se muestra en la figura 4.1 (imágenes correspondientes al ejemplar 1) en color verde (a) en fase inmadura en su día uno y del mismo ejemplar en color naranja (b) en fase madura en su día quince.



Figura 4.1: Ejemplar 1 en color verde (a) en fase inmadura en su día uno y del mismo ejemplar en color naranja (b) en fase madura en su día quince.

Procesamiento digital de imágenes del experimento 1

El procesamiento digital de imágenes, llevado a cabo por los algoritmos descritos en el capítulo anterior, los cuales se unieron en una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés), que se muestra en la figura 4.2, permite de una manera amigable para el usuario, procesar las 900 imágenes del experimento 1, ya se de una sola imagen o un grupo imágenes (donde procesa el ejemplar asignado y sus imágenes asociadas correspondientes a cada día de muestreo).

La opción de una sola muestra, realiza el siguiente procedimiento: al elegir esta opción aparece un cuadro de dialogo (donde se solicita que imagen se desea procesar); una vez seleccionada una de las 900 imágenes de la base de datos, se realiza el proceso de segmentación; posteriormente, se extraen los parámetros de color de la imagen segmentada; y, por último, se despliega en pantalla la imagen original, la imagen segmentada,

la información de color (L^* , a^* , b^* , C_{ab}^* y h_{ab}), el tiempo de procesamiento (en segundos) y la categorización calculada (a partir de los umbrales $h_{ab} \approx 120^\circ$ y $h_{ab} \approx 60^\circ$) de estado de madurez ((1) = verde, (2) = rayados y (3) maduros). Por ejemplo, en la figura 4.2 se muestra la interfaz gráfica de usuario del procesamiento de la imagen 841 del experimento 1; donde se puede apreciar la imagen original el ejemplar y el fondo, mientras que, la imagen procesada presenta el ejemplar segmentado de la imagen original; en la parte central de arriba hacia abajo se puede apreciar el tiempo de procesamiento en segundos, seguido de la información de color ($L^* \approx 34.5657$, $a^* \approx 37.8836$, $b^* \approx 38.9146$, $C_{ab}^* \approx 54.3094$ y $h_{ab} \approx 45.7691$) y, por último, la categorización de acuerdo al estado de madurez, que, para este ejemplar se encuentra en la categoría 3 (maduro).

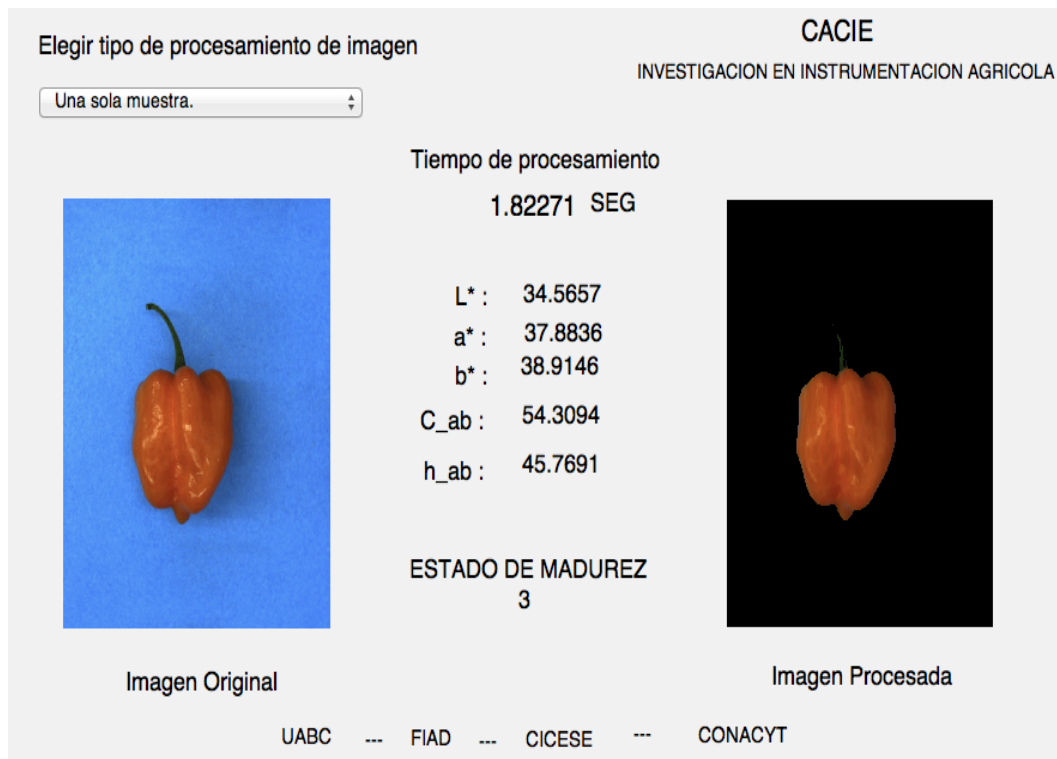


Figura 4.2: Pantalla de la interfaz gráfica de usuario para el procesamiento de imágenes.

Por otro lado, la opción de grupo (Figura 4.3) realiza el siguiente procedimiento: solicita el número de grupo (1-60), correspondiente al ejemplar que se desea procesar; posteriormente, el usuario elige presionar el botón ANALIZAR o BORRAR DATOS. Si presiona el botón ANALIZAR el programa realiza la extracción de la matriz de color y despliega los datos de la siguiente manera: despliega la imagen del día 1 y el día 15 en la parte superior de la pantalla; la información de color (Día, L^* , a^* , b^* , C_{ab}^* , h_{ab}); La columna MADUREZ, corresponde a la estimación calculada del estado de madurez del ejemplar analizado; las gráficas, de arriba hacia abajo, inician con el diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color del ejemplar, continua con la componente L^* , luego

presenta el croma (C_{ab}^*) y por último, la evolución del ángulo de tono (h_{ab}). El programa mantendrá las gráficas previas conforme se ingresen nuevos ejemplares para analizar, es decir, que se podrá comparar comportamiento simultáneamente de varios ejemplares. Por otro lado, si se desea iniciar un nuevo análisis sin gráficas previas, se elige la opción BORRAR DATOS, y el programa borrará los datos previos e inicializará el proceso de nuevo.

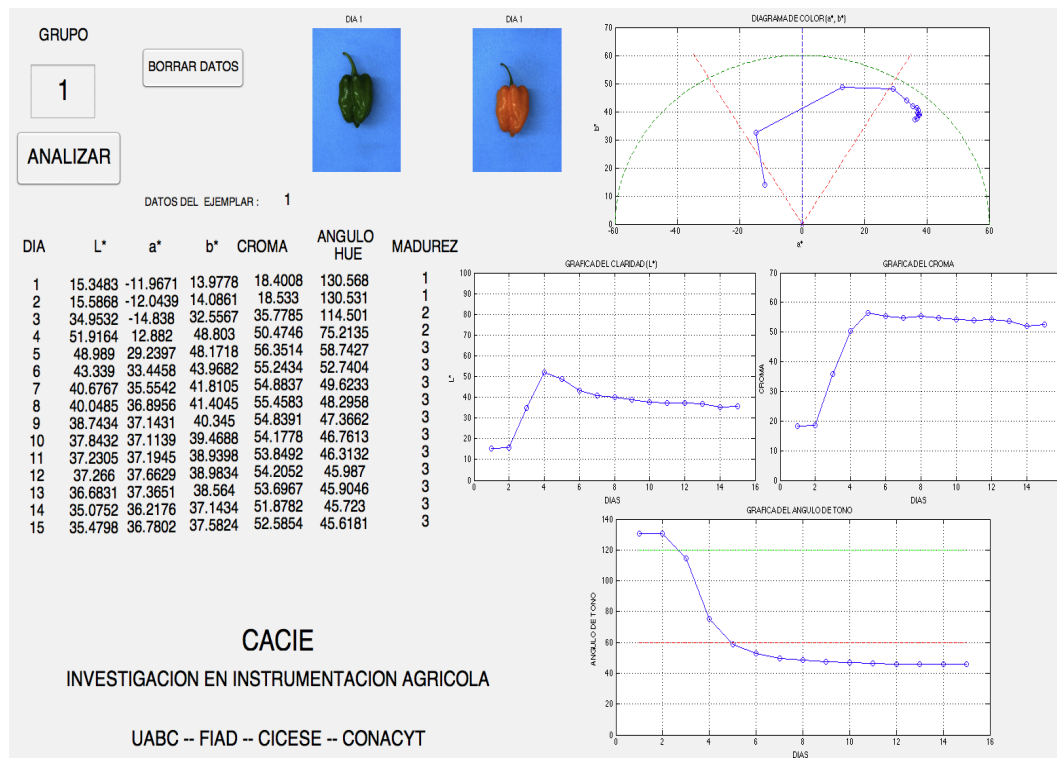


Figura 4.3: Pantalla de la interfaz gráfica de usuario para el procesamiento de evolución de color por ejemplar.

4.2.2. Resultados: evolución de color de la variedad Jaguar

Los resultados de la evolución de color de los chiles Habaneros de la variedad Jaguar se presentan en el siguiente orden: el diagrama de color a^*-b^* con la nube de puntos del número total de imágenes procesadas. La gráfica de la componente L^* promedio con respecto al tiempo; el diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio por grupo de madurez, la gráfica del croma C_{ab}^* promedio con respecto al tiempo; y por último, gráfica del ángulo de tono h_{ab} promedio con respecto al tiempo.

En la figura 4.4, se muestra la nube de puntos correspondiente a los datos de color extraídos de las 900 imágenes. Los grupos de ejemplares categorizados como verdes,

rayados y maduros se etiquetaron con tres símbolos (círculo, triángulo y cuadrado), respectivamente, y representan la distribución color de los tres grupos analizados en post-cosecha. Con esta información de color de los tres grupos de madurez, se identificaron y se ajustaron dos umbrales que separan las regiones de tonos entre las fases de madurez (verdes, rayados y maduros) con base a información previamente documentada para el chile Habanero variedad Jaguar [97]. El primer umbral ($h_{ab} \approx 120^\circ$) separa la región entre los tonos verdes y los tonos amarillos, el segundo umbral ($h_{ab} \approx 60^\circ$) separa la región entre los tonos amarillos y naranjas para éste fruto. La curva de evolución de color (EC) que inicia, por ejemplo, en un punto P en la región de los tonos verdes (después del umbral de $h_{ab} \approx 120^\circ$, tomando en cuenta el sentido opuesto de las manecillas del reloj) y que se desplaza durante su evolución siguiendo la curva EC para alcanzar los tonos naranjas al cruzar el umbral de $h_{ab} \approx 60^\circ$ hasta llegar a un punto Q en señal de madurez. La evolución normal de tonos verdes a tonos naranjas, representativa de esta variedad. Sin embargo, también se observaron ejemplares que se mantuvieron en la región de los tonos verdes sin presentar evolución de color.

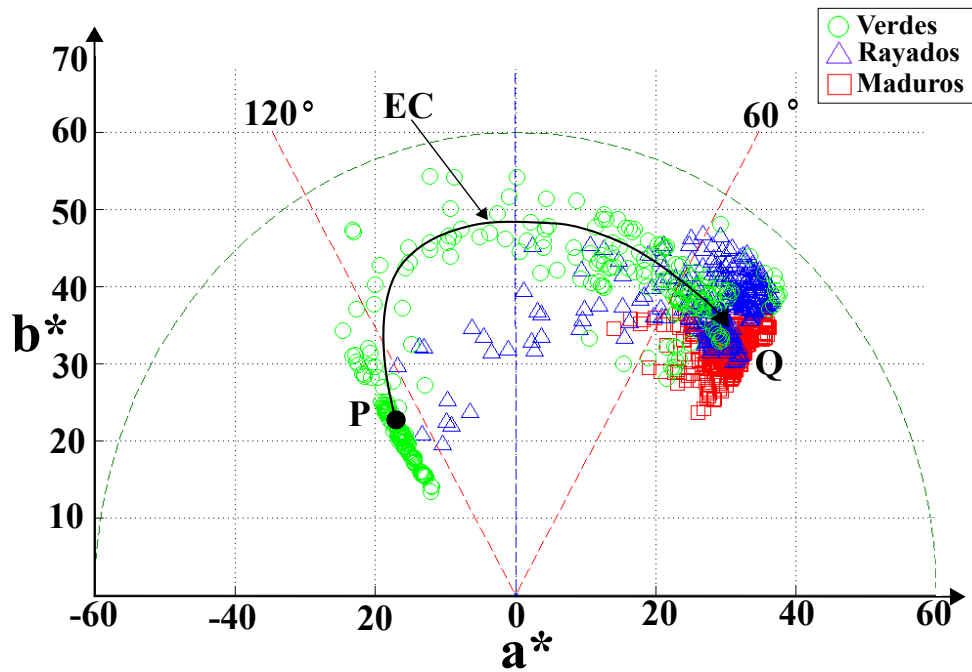


Figura 4.4: Diagrama de color a^*-b^* del chile Habanero de la variedad Jaguar.

En la figura 4.5 se presenta la gráfica de la componente L^* (claridad) promedio por día de cada grupo de madurez con respecto al tiempo. En donde se puede apreciar como la componente L^* , para el grupo de madurez verde incrementa su valor promedio de $L^* \approx 20$ a $L^* \approx 40$; mientras que los valores promedio del grupo de madurez rayados inician en $L^* \approx 30$ e incrementan su valor a valores $L^* \approx 40$; el grupo maduro se mantiene en $L^* \approx 30$; lo que se significa que los chiles habanero de variedad Jaguar

inician en tonos oscuros (fase verde), evolucionan hacia tonos claros (fase madura) y regresan a tonos oscuros en su post-madurez.

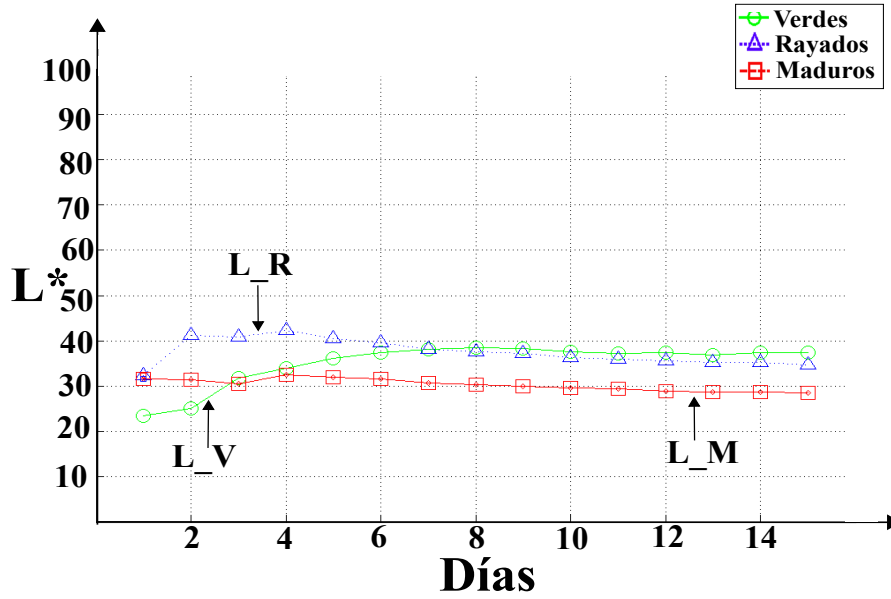


Figura 4.5: Gráfica de la componente L^* promedio con respecto al tiempo del experimento 1.

En la figura 4.6, se presenta el diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio por grupo de madurez. La curva EC_V describe la evolución promedio de color de los ejemplares categorizados dentro del grupo verdes, que inicia en tonos mayores al umbral de $h_{ab} \approx 120^\circ$ y, pasando por tonos amarillos alcanza valores cercanos al umbral naranja $h_{ab} \approx 60^\circ$, sin cruzarlo. Por otro lado, los ejemplares categorizados en el grupo rayados que se representa por la curva EC_R, su valor promedio de color inicia en los tonos amarillos ($h_{ab} \approx 90^\circ$) y alcanza los tonos naranjas al cruzar el umbral de $h_{ab} \approx 60^\circ$. La curva EC_M que describe a los ejemplares categorizados dentro del grupo maduro con sus valores promedio de color que inician después del umbral naranja $h_{ab} \approx 60^\circ$. Lo descrito anteriormente concuerda con los umbrales propuestos para la identificación de las regiones de las fases de madurez del chile Habanero.

El croma C_{ab}^* promedio de los tres grupos de madurez con respecto al tiempo, se muestra en la figura 4.7. Las curvas C_V, C_R y C_M describen la evolución de croma con respecto al tiempo de los grupos de madurez (verdes, rayados y maduros) respectivamente. La curva C_V incrementa su croma de valores de $C_{ab}^* \approx 30$ hasta valores de $C_{ab}^* \approx 30$; mientras que la curva C_R lo hace desde valores $C_{ab}^* \approx 30$ hasta valores cercanos a $C_{ab}^* \approx 50$; con respecto a la curva la curva C_M, ésta se mantiene aproximadamente en valores de $C_{ab}^* \approx 40$.

Por otro lado, en la figura 4.8, se muestra la evolución del ángulo de tono h_{ab} respecto al tiempo de cada grupo de madurez; además, se incluyen los umbrales en $h_{ab} \approx 120^\circ$ y

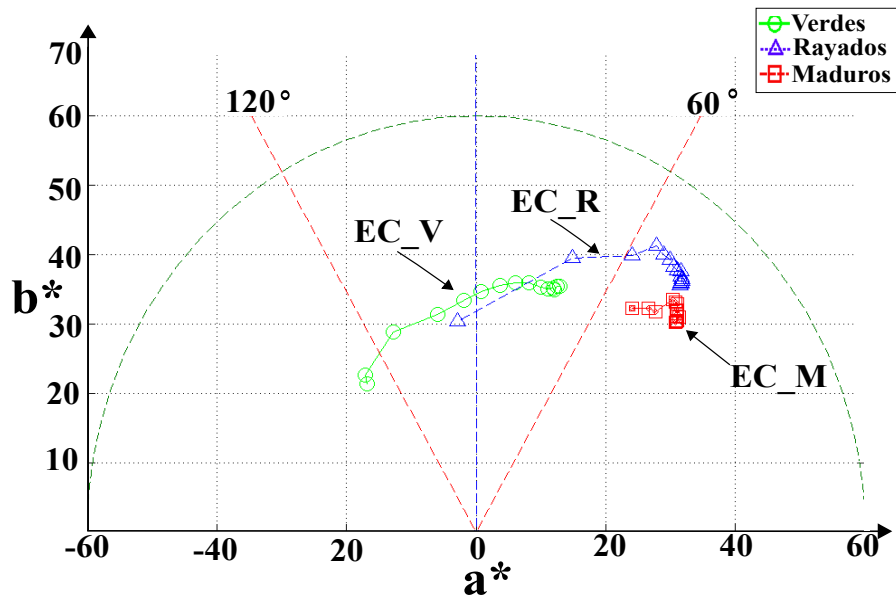


Figura 4.6: Diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio por grupo de madurez.

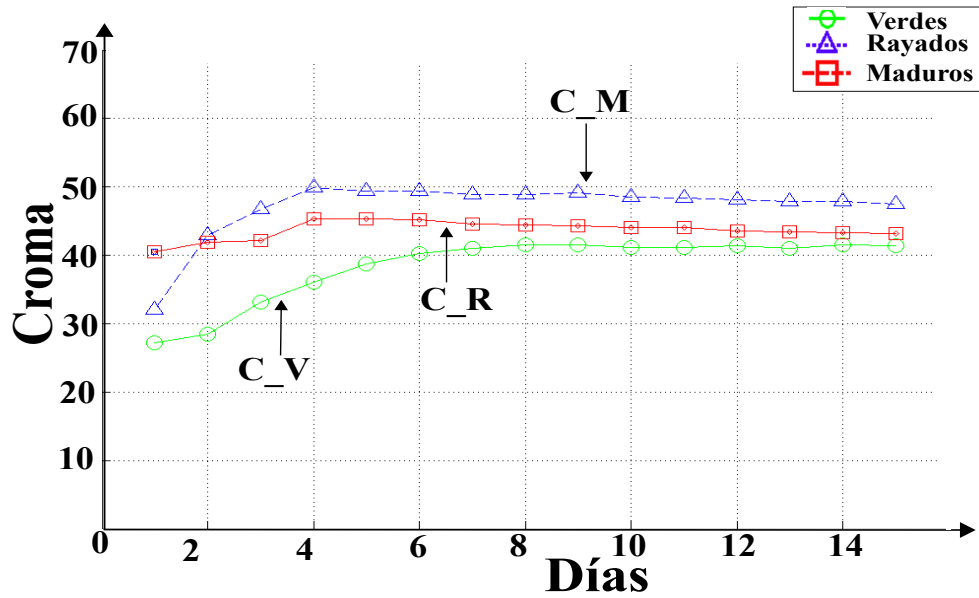


Figura 4.7: Gráfica del croma C_{ab}^* promedio con respecto al tiempo del experimento 1.

$h_{ab} \approx 60^\circ$ que definen las regiones A (para tonos verdes), B (para tonos amarillos) y C (para tonos naranjas). Las curvas de evolución de h_{ab} : H_V, H_R y H_M, corresponden a cada grupo de madurez (verdes, rayados y maduros) respectivamente. De la figura se

puede observar como la curva H_V inicia en valores cercanos a $h_{ab} \approx 130^\circ$ (tonos verdes) y finaliza en valores cercanos a $h_{ab} \approx 80^\circ$ (amarillos-naranjas); sin embargo, la curva H_R inicia en valores de $h_{ab} \approx 100^\circ$ (tonos amarillos) y evoluciona hasta alcanzar los tonos naranjas ($h_{ab} \approx 45^\circ$); los ejemplares categorizados como maduros inicia después del umbral de ($h_{ab} \approx 60^\circ$), lo cual concuerda con los umbrales propuestos, y su evolución se mantiene en esa región.

Las figuras correspondientes a la evolución de los parámetros de color mostrados (Figuras 4.4 a 4.8), así como las rutinas de procesamiento e interfaces gráficas para manejo de las imágenes, se encuentran entre las principales aportaciones de este trabajo de investigación, debido a la documentación y registro de la evolución de color promedio en post-cosecha del chile Habanero variedad Jaguar a través de un método no invasivo, utilizando un sistema de visión por computadora, que realiza la extracción de la información de color a partir de imágenes digitales.

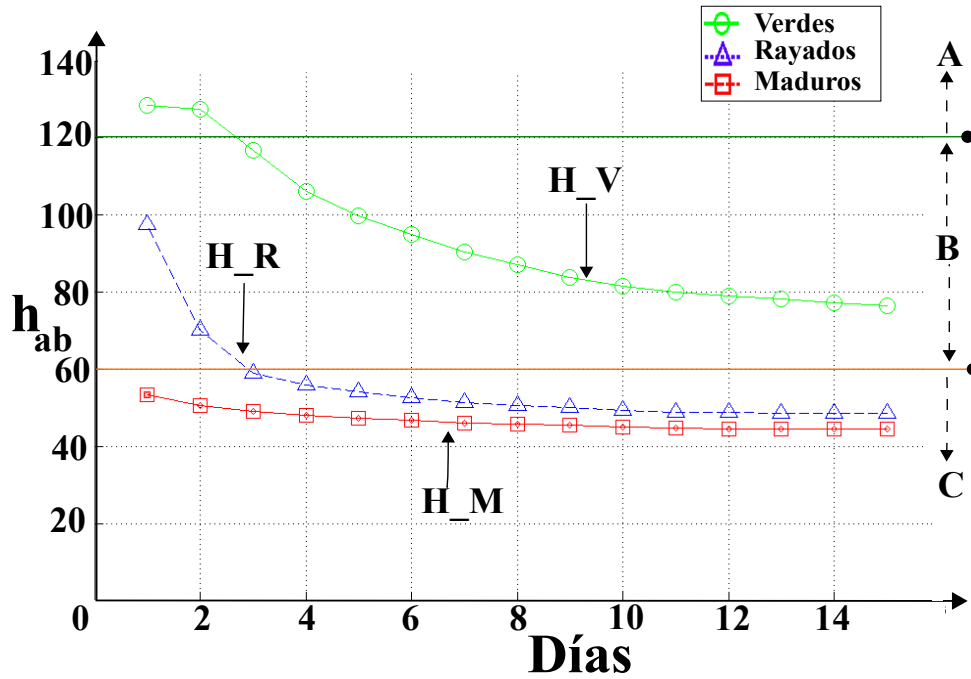


Figura 4.8: Gráfica del ángulo de tono h_{ab} promedio con respecto al tiempo del experimento 1.

4.3. Experimento 2: chile Habanero de la variedad Mayan K'iin, junio 2013

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento digital de las imágenes de chiles Habaneros de la variedad Mayan K'iin durante su

etapa de post-cosecha. En la sección 4.3.1 y sección 4.3.2 se describe la metodología utilizada para este experimento y los resultados obtenidos, respectivamente.

Los datos de color se presentan en el espacio CIELAB, en la siguiente secuencia: se presenta el diagrama de color a^*-b^* con la nube de puntos correspondientes al total de las sub-imágenes de cada ejemplar. Posteriormente, la gráfica de la componente L^* con respecto al tiempo; a continuación, se presenta el diagrama de color a^*-b^* promedio de la evolución de color; posteriormente se muestra la gráfica de croma (C_{ab}^*) promedio con respecto al tiempo; y, por último, se presenta la evolución del ángulo de tono (h_{ab}) con respecto al tiempo.

4.3.1. Metodología del experimento 2

Muestras del experimento 2

Las muestras utilizadas para el desarrollo de este experimento, provienen como en el caso anterior de un cultivo experimental de chile Habanero en condiciones acuapónicas, que se encuentran en etapa de investigación y desarrollo en el invernadero del grupo de Diseño y Desarrollo de Tecnología Acuícola del Departamento de Acuicultura del CICESE, las muestras en esta ocasión fueron de chile Habanero de la variedad Mayan K'iin.

Para este experimento, el día martes 25 de junio de 2013, se cosecharon 49 ejemplares de chile Habanero variedad Mayan K'iin en estado de madurez verde. Los cuales se seleccionaron aleatoriamente y se clasificaron, como verdes, por inspección visual en el laboratorio.

Adquisición automática de imágenes del experimento 2, utilizando el montaje 2

El montaje 2 opera en modalidad automática, por lo que se puede incrementar la tasa de muestreo para adquirir una imagen cada hora, lo cual aumenta la capacidad de medir y registrar cambios en la evolución de color de los frutos en post-cosecha. Si el fruto evoluciona de manera acelerada el sistema tiene la capacidad de realizar disparos en ráfaga o con una tasa de muestreo más alta.

Para este experimento, la tasa de muestreo fue configurada para adquirir una imagen cada hora durante 31 días, lo cual da un total de 744 imágenes; que, a su vez, al aplicar el algoritmo de sub-imágenes y extraer la información de color de los 49 ejemplares en la imagen de cada hora a partir de su extracción por área de la imagen procesada, se generó un total de 36456 sub-imágenes. En la figuras 4.9 y 4.10 se muestran las imágenes correspondientes a la primera hora y la última hora del experimento 2, respectivamente. A las sub-imágenes generadas, se les aplicaron los algoritmos de segmentación, extracción de color y generación de matriz. Una vez obtenida la información de color de cada sub-imagen se procedió al análisis de evolución de color en el espacio CIELAB, el cual se presenta en la sección 4.3.2.

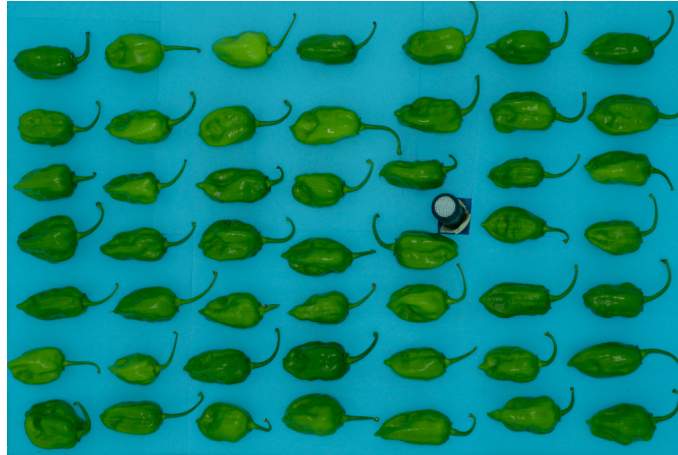


Figura 4.9: Imagen de la primera hora de muestreo de los 49 ejemplares del experimento junio 2013.

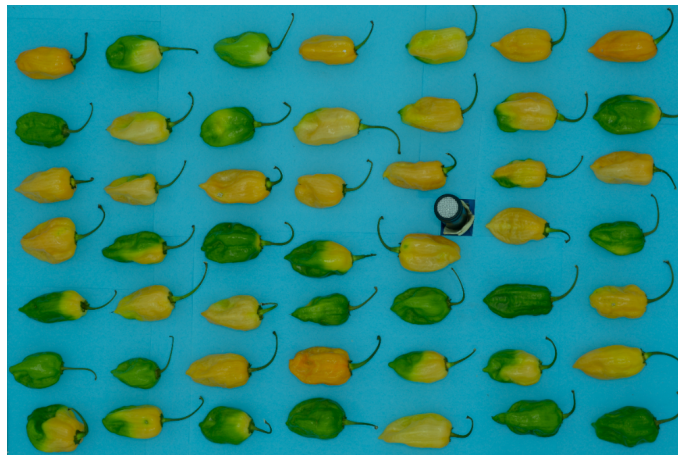


Figura 4.10: Imagen de la última hora de muestreo de los 49 ejemplares del experimento junio 2013.

Es importante mencionar, que durante el experimento ocurrió un incremento de humedad relativa ($HR \gtrsim 60\%$) se introdujo material disecante para mantener los niveles de HR ($HR \approx 60\%$) dentro de la cabina aislada. Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 4.10 esto provocó que se retrasara el proceso de maduración en post-cosecha, ya que los ejemplares evolucionaron en color, pero solo alcanzaron tonalidades amarillas. Cabe resaltar, que el objetivo de los experimentos, era evaluar la capacidad de medición del color utilizando un SVC en productos agrícolas, en este caso de estudio el chile Habanero de la variedad Mayan K'iin, lo cual se describirá en la sección 4.3.2.

4.3.2. Resultados: evolución de color de la variedad Mayan K'iin

Los resultados de la evolución de color de los chiles Habaneros de la variedad Mayan K'iin se presentan en el siguiente orden: el diagrama de color a^*-b^* con la nube de puntos correspondientes al total de imágenes procesadas. La gráfica del componente L^* promedio con respecto al tiempo; el diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio, la gráfica del croma C_{ab}^* promedio con respecto al tiempo y, por último, la gráfica del ángulo de tono h_{ab} promedio con respecto al tiempo.

En la figura 4.11, se muestra la nube de puntos correspondiente a los datos promedio de color extraídos por día de las 36456 sub-imágenes. Para una mejor interpretación y representación de los datos se realizó una sub-clasificación en dos categorías: verdes y rayados, a partir de la evolución total de cada uno de los 49 ejemplares; es decir, los ejemplares que se mantuvieron verdes durante el experimento se categorizaron como verdes (etiquetados con un círculo verde) y los que cruzaron el umbral y evolucionaron hacia tonos amarillos se categorizaron como rayados (etiquetados con un triángulo azul).

En la figura 4.11, se presentan los grupos de ejemplares categorizados como verdes y rayados, que representan la distribución color de los ejemplares de la variedad Mayan K'iin analizados en post-cosecha. Con los dos umbrales propuestos $h_{ab} \approx 120^\circ$ (umbral verde) y $h_{ab} \approx 60^\circ$ (umbral naranja) que separan las regiones de tonos entre las fases de madurez (verdes, rayados y maduros) del chile Habanero; el primer umbral verde separa la región entre los tonos verdes y los tonos amarillos. El segundo umbral naranja separa la región entre los tonos amarillos y naranjas para éste fruto. La curva de evolución de color (EC) que inicia, por ejemplo, en un punto P en la región de los tonos verdes (después del umbral de $h_{ab} \approx 120^\circ$, tomando en cuenta el sentido opuesto de las manecillas del reloj) y que se desplaza durante su evolución siguiendo la curva EC y cruza el umbral de $h_{ab} \approx 120^\circ$ hasta alcanzar los tonos amarillos para llegar a un punto Q $h_{ab} \approx 90^\circ$ con una evolución de tonos verdes hasta tonos amarillos. Sin embargo, debido a la modificación de la HR, también se observaron ejemplares que se mantuvieron en la región de los tonos verdes sin presentar evolución de color.

En la figura 4.12 se presenta la gráfica de la componente L^* (claridad) promedio por día del total de los ejemplares con respecto al tiempo. En la figura mencionada, se puede apreciar como la componente L^* promedio inicia en $30 \lesssim L^* \gtrsim 40$ y se mantiene hasta el día número veinte aproximadamente, lo que se significa que los chiles /Habaneros de variedad Mayan K'iin inician en tonos más claros que la variedad Jaguar (fase verde) y evolucionan hacia tonos claros (fase rayada) a partir del día veinte.

En la figura 4.13, se presenta el diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio del experimento 2, en la cual se representa la curva evolución de color (EC) para el total de las muestras. Se puede apreciar en la figura 4.13, que los valores de la curva EC alcanzan a cruzar el umbral verde, pero se mantienen en la región de rayados sin cruzar el umbral naranja. Lo que indica que los ejemplares en sus valores promedio de color a^*-b^* llegaron a tonalidades amarillas, y algunos ejemplares se mantuvieron en los tonos verdes.

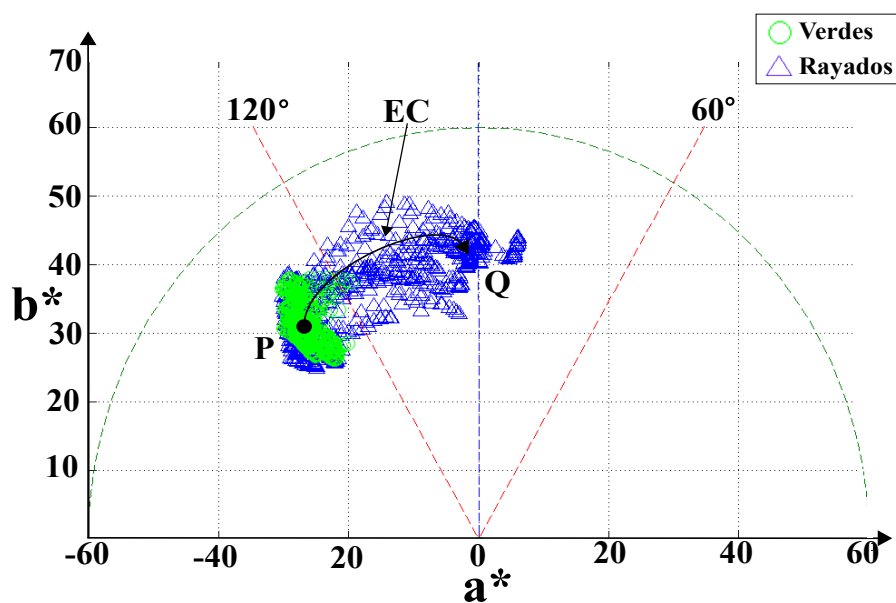


Figura 4.11: Diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color de la variedad Mayan K'iin.

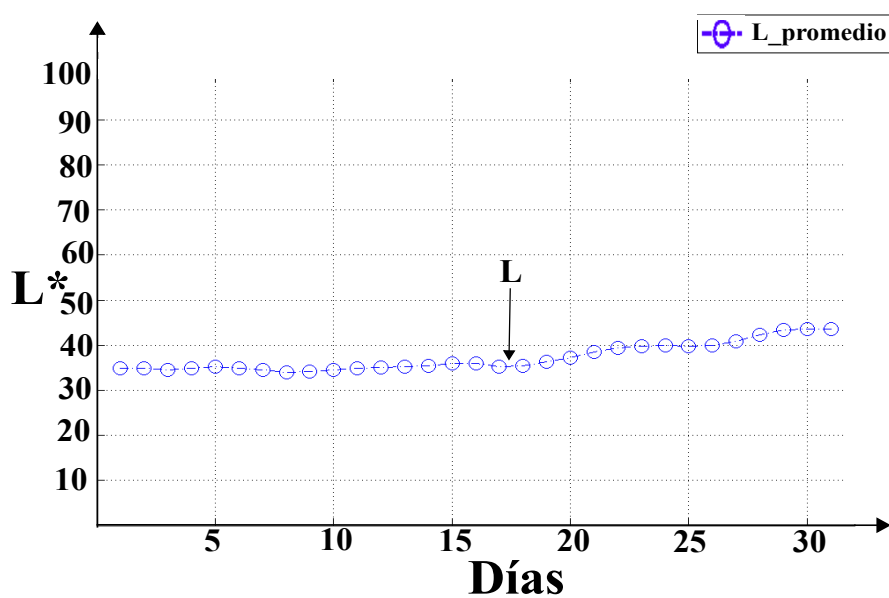


Figura 4.12: Gráfica de la componente L^* promedio del experimento 2.

En la figura 4.14 se representa la curva de evolución (C) del croma promedio, la cual se mantiene en un valor aproximado de $C_{ab}^* \approx 40$.

Por otro lado, la evolución de los valores del ángulo de tono h_{ab} en la figura 4.15

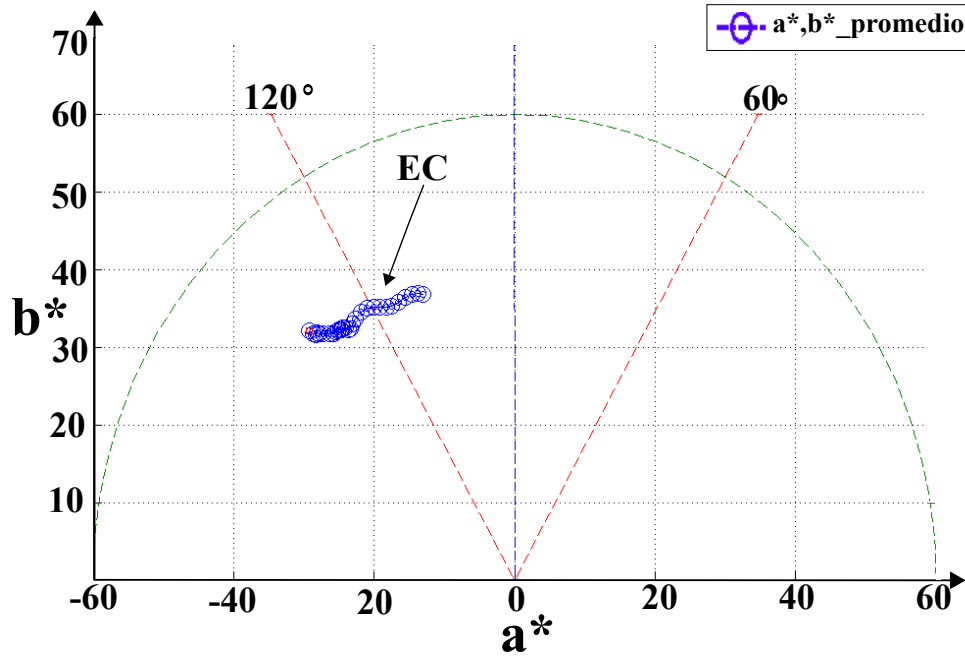


Figura 4.13: Diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio del experimento 2.

describe el comportamiento de h_{ab} promedio con respecto al tiempo del total de los ejemplares por medio de la curva de evolución (H); además, se incluyen los umbrales verde ($h_{ab} \approx 120^\circ$) y naranja ($h_{ab} \approx 60^\circ$) que definen las regiones A (para tonos verdes), B (para tonos amarillos) y C (para tonos naranjas); de la figura se puede observar como la curva H inicia en valores cercanos a $h_{ab} \approx 130^\circ$ (tonos verdes) y finaliza en valores cercanos a $h_{ab} \approx 110^\circ$ (verde-amarillos).

4.4. Experimento 3: chile Habanero de la variedad Mayan K'iin, agosto 2013

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del procesamiento digital de imágenes de chiles Habaneros de la variedad Mayan K'iin durante su etapa de post-cosecha. En la sección 4.4.1 y sección 4.4.2 se describe la metodología utilizada para este experimento y los resultados obtenidos, respectivamente.

Los datos de color se presentan en el espacio CIELAB, en la siguiente secuencia: se presenta el diagrama de color a^*-b^* con la nube de puntos correspondientes al total de las sub-imágenes de cada ejemplar. Posteriormente, la gráfica de la componente L^* con respecto al tiempo; a continuación, se presenta el diagrama de color a^*-b^* promedio de la evolución de color; posteriormente se muestra la gráfica de croma (C_{ab}^*) promedio

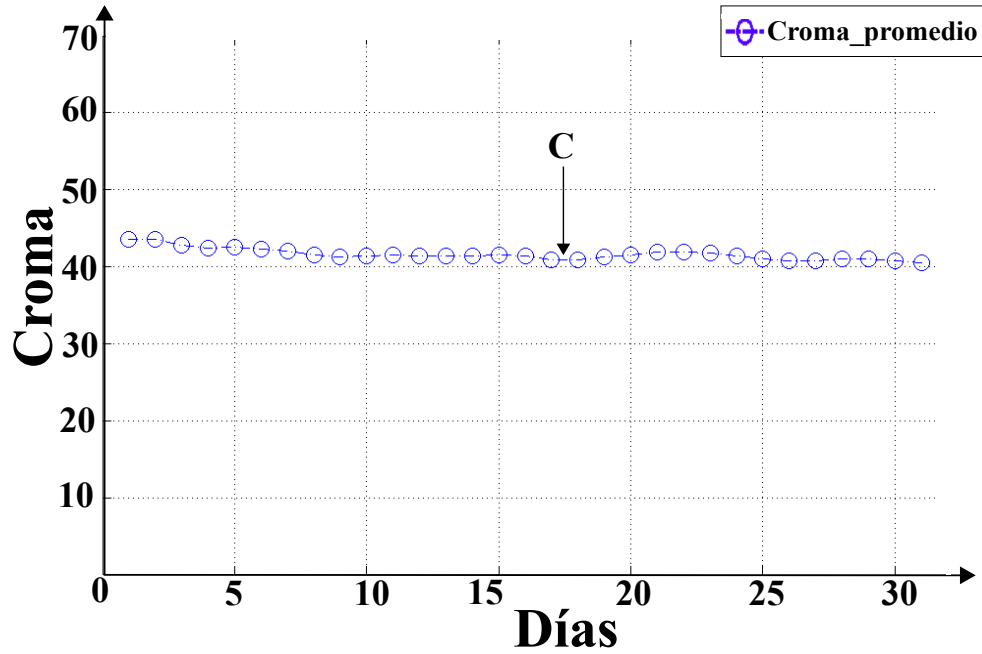


Figura 4.14: Gráfica del cromatismo C_{ab}^* con respecto al tiempo del experimento 2.

con respecto al tiempo y por último, se presenta la evolución del ángulo de tono (h_{ab}) con respecto al tiempo.

4.4.1. Metodología del experimento 3

Muestras experimento 3

Las muestras utilizadas para el desarrollo de este experimento fueron de chile Habanero de la variedad Mayan K'iin, se cosecharon del invernadero del grupo de Diseño y Desarrollo de Tecnología Acuícola en el Departamento de Acuicultura de CICESE.

Para este experimento, el día lunes 8 de agosto de 2013, se cosecharon 35 ejemplares de chile Habanero variedad Mayan K'iin en estado de madurez verde, debido al tamaño de los chiles (más grandes) se disminuyó el número ejemplares. Los cuales se seleccionaron aleatoriamente y se clasificaron, como verdes, por inspección visual en el laboratorio.

Adquisición automática de imágenes del experimento 3, utilizando el montaje 2

El montaje 2, se utilizó para realizar la adquisición de las imágenes del experimento 3. La tasa de muestreo fue configurada para adquirir una imagen cada hora durante 8 días, lo cual da un total de 192 imágenes; que, a su vez, al aplicar el algoritmo de sub-

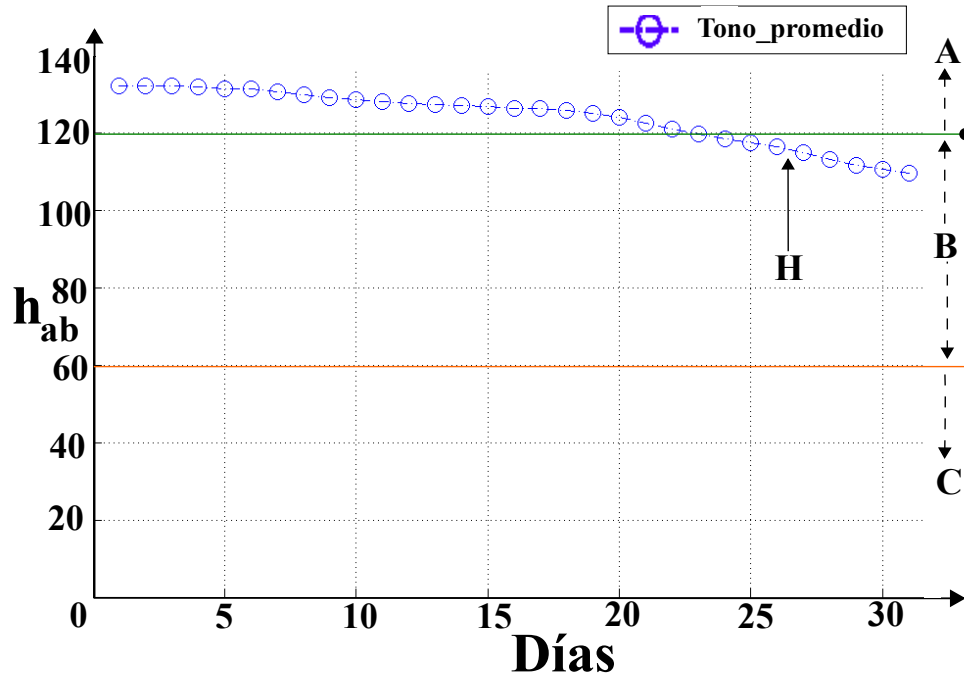


Figura 4.15: Gráfica del ángulo de tono h_{ab} con respecto al tiempo del experimento 2.

imágenes y extraer la información de color de los 35 ejemplares en la imagen de cada hora a partir de su extracción por área de la imagen procesada, se generó un total de 6720 sub-imágenes. En la figuras 4.16 y 4.17 se muestran las imágenes correspondientes a la primera hora y la última hora del experimento 3, respectivamente. A las sub-imágenes generadas, se aplicaron los algoritmos de segmentación, extracción de color y generación de matriz. Una vez obtenida la información de color de cada sub-imagen se procedió a su análisis de evolución de color en el espacio CIELAB, el cual se presenta en la sección 4.4.2.

4.4.2. Resultados: evolución de color de la variedad Mayan K'iin

Los resultados de la evolución de color de los chiles Habaneros de la variedad Mayan K'iin se presentan de en el siguiente orden: el diagrama de color a^*-b^* con la nube de puntos correspondientes al total de imágenes procesadas; la gráfica de la componente L^* promedio con respecto al tiempo, el diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio, la gráfica del croma C_{ab}^* promedio con respecto al tiempo y por último, gráfica del ángulo de tono h_{ab} promedio con respecto al tiempo.

En la figura 4.18, se muestra la nube de puntos correspondiente a los datos promedio de color extraídos por día de las 6720 sub-imágenes. Para una mejor interpretación y representación de los datos se realizó una sub-clasificación en dos categorías: verdes y



Figura 4.16: Imagen de la primera hora de muestreo del día 1 del experimento 3.



Figura 4.17: Imagen de la última hora de muestreo del día 8 del experimento 3.

rayados, a partir de la evolución total de cada uno de los 35 ejemplares. Es decir, los ejemplares que se mantuvieron verdes durante el experimento se categorizaron como verdes (etiquetados con un círculo verde) y los que cruzaron el umbral y evolucionaron hacia tonos amarillos se categorizaron como rayados (etiquetados con un triángulo azul).

En la figura 4.18, se presentan los grupos de ejemplares categorizados como verdes y rayados, que representan la distribución de color de los ejemplares de la variedad Mayan K'iin analizados en post-cosecha. Con los dos umbrales propuestos $h_{ab} \approx 120^\circ$ (umbral verde) y $h_{ab} \approx 60^\circ$ (umbral naranja) que separan las regiones de tonos entre las fases de madurez (verdes, rayados y maduros) del chile Habanero. El primer umbral verde separa la región entre los tonos verdes y los tonos amarillos, el segundo umbral naranja separa la región entre los tonos amarillos y naranjas para ésta hortaliza. La

curva de evolución de color (EC) que inicia, por ejemplo, en un punto P en la región de los tonos verdes (después del umbral de $h_{ab} \approx 120^\circ$, tomando en cuenta el sentido opuesto de las manecillas del reloj) y, que se desplaza durante su evolución siguiendo la curva EC y cruza el umbral de $h_{ab} \approx 120^\circ$ hasta alcanzar los tonos amarillos para llegar a un punto Q en la región de los amarillos-naranjas ($h_{ab} \approx 80^\circ$).

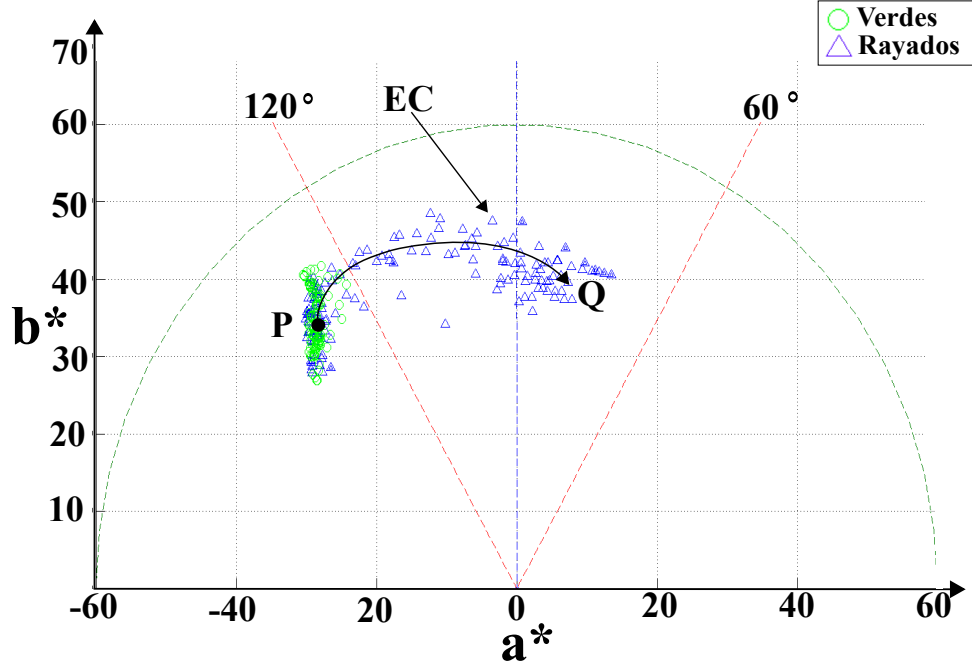


Figura 4.18: Diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color del experimento 3.

En la figura 4.19 se presenta la gráfica de la componente L^* (claridad) promedio por día del total de los ejemplares con respecto al tiempo. En la gráfica se puede apreciar como la componente L^* promedio inicia en $30 \lesssim L^* \gtrsim 50$, lo que se significa que los chiles habanero de variedad Mayan K'iin inician en tonos más claros que la variedad Jaguar (fase verde) y evolucionan hacia tonos claros (fase rayada) a partir del día veinte.

En la figura 4.20, se presenta el diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio del experimento 3. El diagrama representa la curva evolución de color (EC) incluyendo el total de las muestras y sus respectiva evolución. Se puede apreciar en la Figura 4.20, que los valores de la curva EC alcanzan a cruzar el umbral verde, pero se mantienen en la región de rayados sin cruzar el umbral naranja. Lo que indica que los ejemplares en sus valores promedio de color a^*-b^* llegaron a tonalidades amarillas, y algunos ejemplares se mantuvieron en los tonos verdes.

En la figura 4.21 se representa la curva de evolución (C) del croma promedio, la cual se mantiene en un valor aproximado de $40 \lesssim C_{ab}^* \gtrsim 50$.

Por otro lado, se tiene que la evolución de ángulo de tono h_{ab} en la Figura 4.22, se describe el comportamiento de h_{ab} promedio con respecto al tiempo del total de

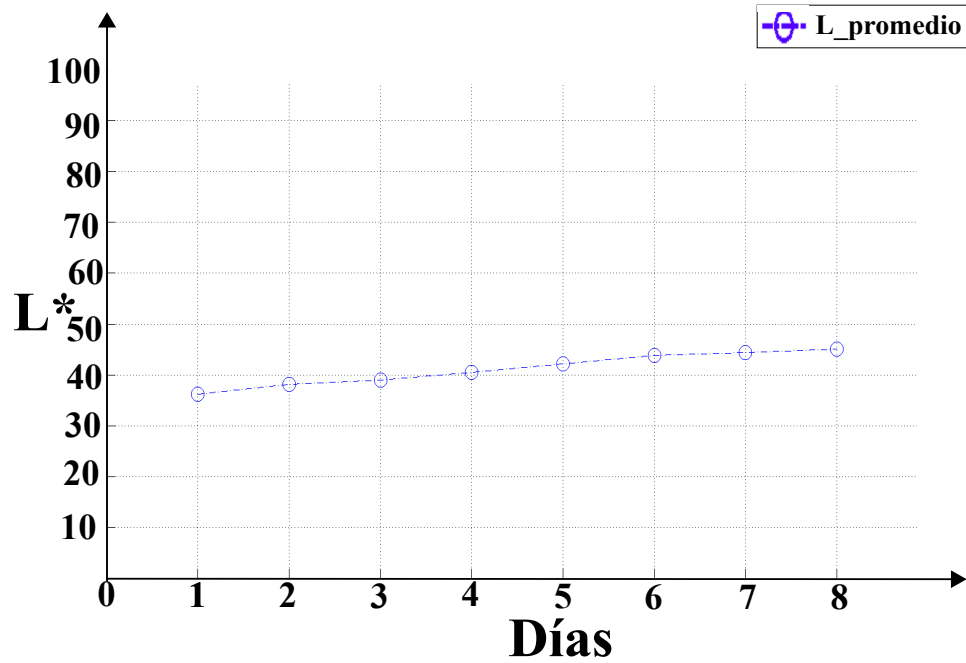


Figura 4.19: Gráfica de la componente L^* promedio con respecto al tiempo del experimento 3.

los ejemplares con la curva de evolución (H), además, se incluyen los umbrales verde ($h_{ab} \approx 120^\circ$) y naranja ($h_{ab} \approx 60^\circ$) que definen las regiones A (para tonos verdes), B (para tonos amarillos) y C (para tonos naranjas); de la figura se puede observar como la curva H inicia en valores cercanos a $h_{ab} \approx 130^\circ$ (tonos verdes) y finaliza en valores cercanos a $h_{ab} \approx 100^\circ$ (verde-amarillos).

4.5. Experimento 4: Uvas de la Rioja, mayo 2013

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las imágenes (visible y NIRS) y análisis de antocianos de uvas de la DOCa Rioja. En la sección 4.5.1, la sección 4.5.2 y la sección 4.5.3 se describe este experimento y los resultados obtenidos en el espectro visible, en NIRS y de antocianos respectivamente.

Dentro del proyecto uvas de la DOCa Rioja, la parte que se llevó a cabo durante la colaboración: fue extraer las imágenes en el espectro visible, en el espectro NIRS y el análisis de antocianos presentes en los granos individuales de 4 variedades de uva de la DOCa Rioja de dos puntos de muestreo.

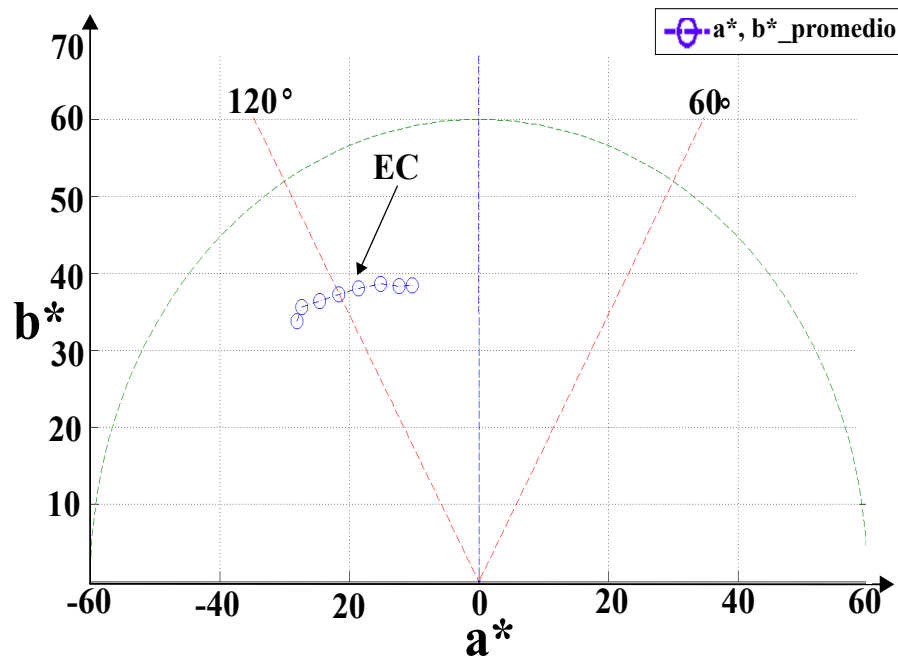


Figura 4.20: Diagrama de color a^*-b^* de la evolución de color promedio del experimento 3.

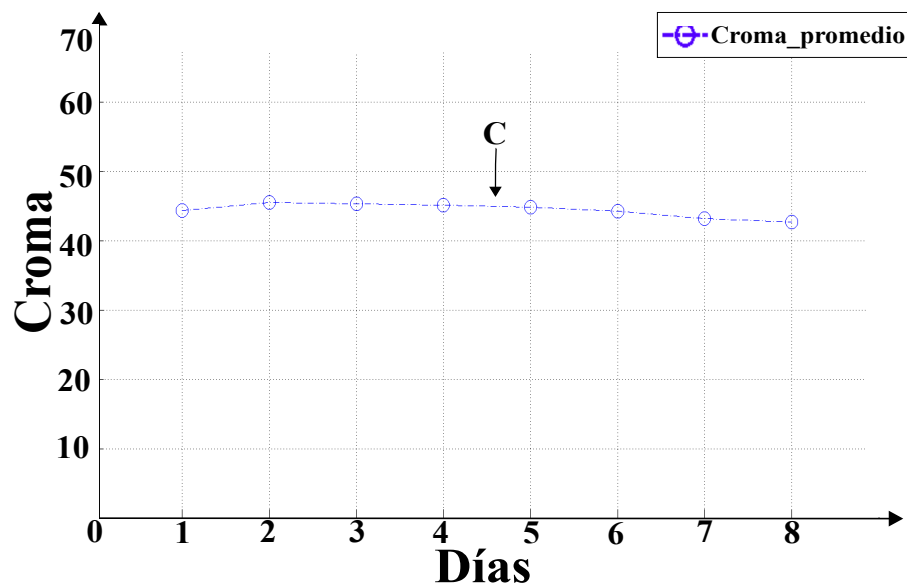


Figura 4.21: Gráfica del croma C_{ab}^* con respecto al tiempo del experimento 3.

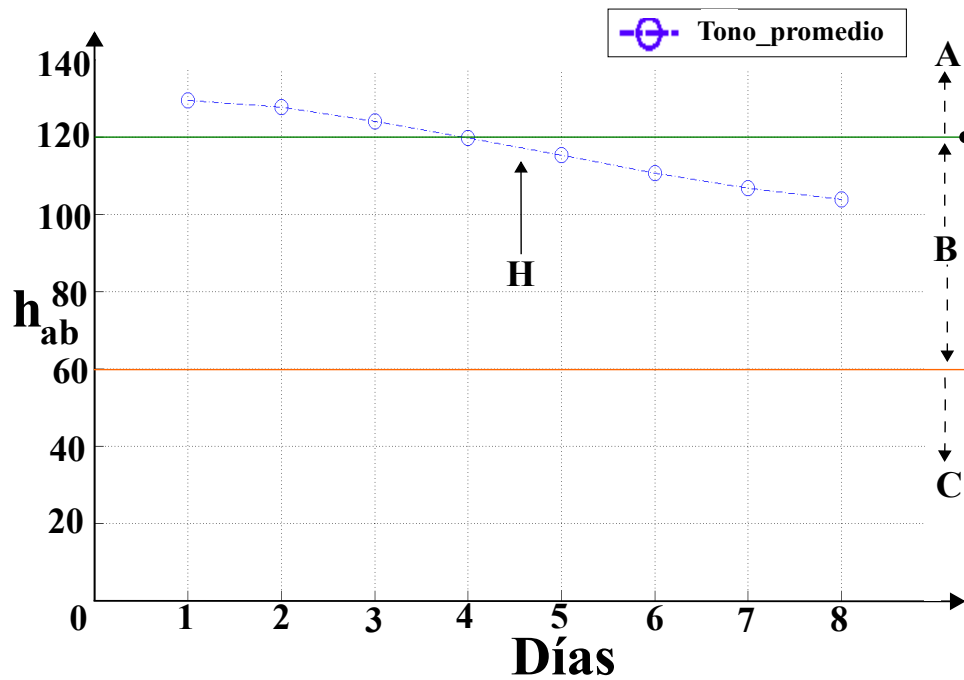


Figura 4.22: Gráfica del ángulo de tono h_{ab} con respecto al tiempo del experimento 3.

4.5.1. Metodología del experimento 4

La metodología utilizada para este experimento se desarrolló de la siguiente manera: se descongelaron los ejemplares. Se adquirieron las imágenes en el espectro visible, las imágenes hiperespectrales NIRS. Se realizó la separación de los hollejos; se extrajeron los antocianos; se inyectaron las muestras con la técnica HPLC, se procesaron los datos y por último, se realizó la interpretación de los resultados.

Muestras del experimento 4

Las muestras para este experimentos corresponden a ejemplares de la región de la DOCa Rioja en su sub-zona denominada Rioja Alta. Se cosecharon en dos puntos de muestreo madurez (D) y post-madurez (E) de acuerdo a sus etapa de madurez, durante el mes de octubre de 2012. Del lote general del muestreo se eligieron 25 ejemplares por cada fase de madurez que proporcionan un total de 50 muestras.

Las variedades seleccionadas fueron etiquetadas con los siguientes nombres de acuerdo a su variedad y origen: Tempranillo, Tira Agustín (TJTA); Tempranillo, Corral Peñolía (TJCP); Graciano (GRP); Garnacha (GAP) y Mazuelo (MZP).

4.5.2. Resultados: análisis de imágenes en el espectro visible

En la figura 4.23, se muestra el resultado del algoritmo de segmentación aplicado a la muestra GAP_{D1} , en donde la figura 4.23 (a) muestra la imagen original a color y la (b) la imagen segmentada.

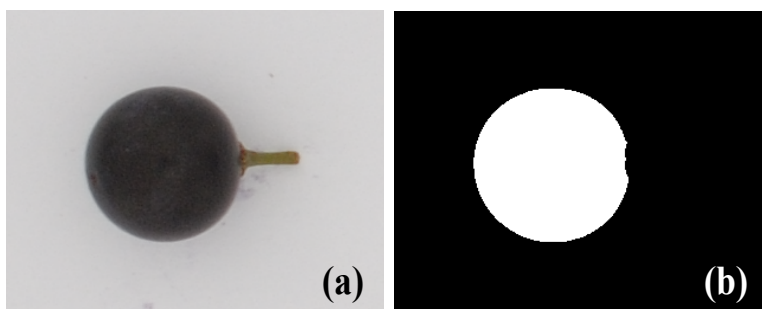


Figura 4.23: Muestra GAP_{D1} , (a) imagen a color de la muestra y (b) imagen segmentada.

En la figura 4.24 se presenta el diagrama de color a^*-b^* . Donde la información se encuentra categorizada por variedades y puntos de muestreo. Como se puede apreciar en la figura 4.24, no hay una clara identificación de las variedades o por puntos de madurez, ya que se traslapan entre ellas.

4.5.3. Resultados: análisis de imágenes hiperespectrales NIRS y antocianos

En la figura 4.25 se presenta, a manera de imagen descriptiva, el ejemplar GAP_{D1} en NIRS a 982 nm (figura 4.25 (a)) y su imagen segmentada (Figura 4.25 (b)). Posteriormente, en el apartado de análisis quimiométrico se describe la información relacionada con los espectros obtenidos de las imágenes hiperespectrales NIRS.

Análisis químico

Un máximo de 11 antocianos fueron identificados y la suma de ellos fue expresado como antocianos totales. Por otra parte, los antocianos se agruparon tomando en cuenta sus estructuras básicas. El contenido total de antocianos en las muestras variaron de 1.0 a 8.4 mg por uva con una desviación estándar de 1.5 mg por uva. El contenido de antocianos no-acilados en las uvas varió de 0.9 a 6.8 mg por uva con una desviación estándar de 1.3 mg por uva. El contenido de los antocianos acilados podría ser calculado como la diferencia entre el total y los antocianos no acilados.

Análisis quimiométrico

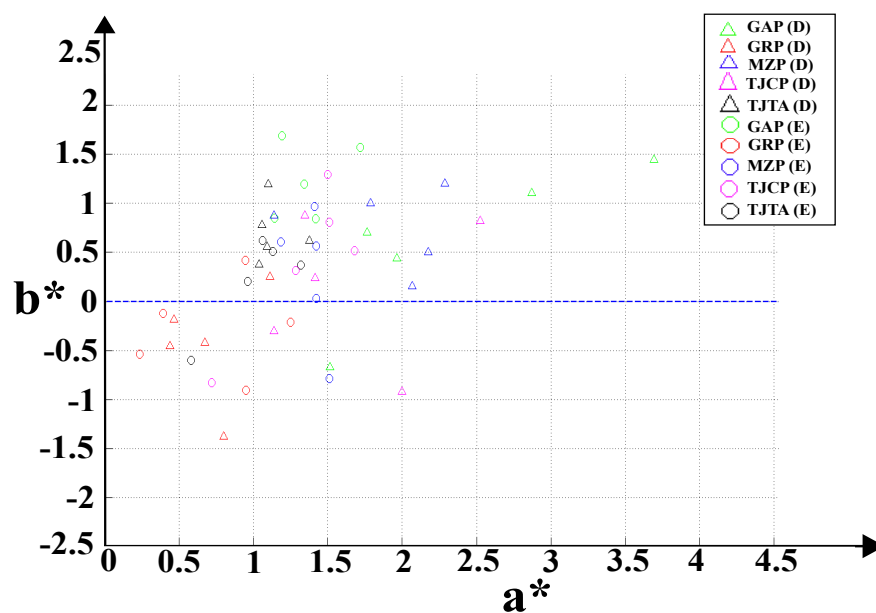


Figura 4.24: Diagrama de color a^*-b^* de las uvas del experimento 4.

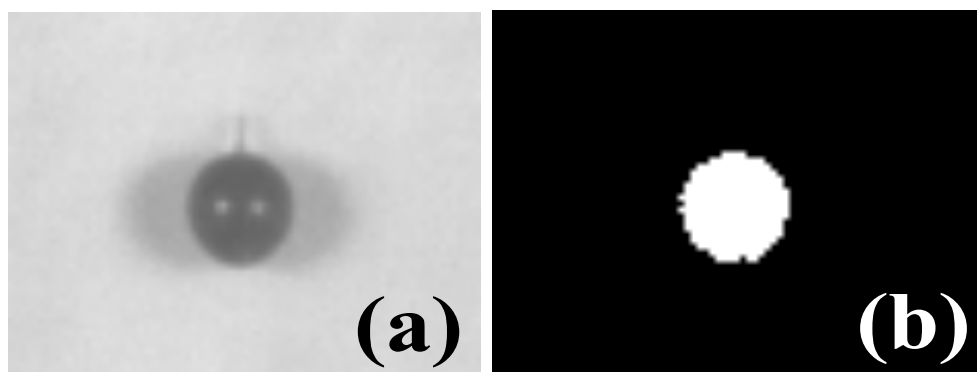


Figura 4.25: Muestra GAP_{D1} a 982 nm, (a) Imagen en NIRS y (b) Imagen segmentada.

Como parte del análisis cuantitativo, una variable normal estándar (SNV 2,5,5,1) espectral de pre-tratamiento se aplica a la matriz espectral en el intervalo de 950 a 1650 nm. El tratamiento matemático se denota como a, b, c, d donde el primer dígito es el número de la derivada; el segundo es el intervalo sobre el cual se calcula la derivada;

Tabla 4.1: Descriptores estadísticos de calibración para los modelos desarrollados en la zona NIR cercana a 950-1650 nm.

Pre-tratamientos Espectrales	Compuestos	T afuera	Factores PLS	N ^a	Est.Min (mg por uva)	SD ^b	Est.Max	SEC ^c	RSQ ^d	SECV ^e (mg por uva)
SNV + Detrend 0,0,1,1	Antocianos totales	3	6	47	0	0.96	5.37	0.51	0.72	0.78
SNV + Detrend 0,0,1,1	Antocianos no acilados	3	6	47	0	0.85	4.63	0.45	0.72	0.70

el tercero es el número de puntos de datos en promedio o suavizado, y el cuarto es el segundo suavizado. A continuación, el análisis de componentes principales se llevó a cabo con el fin de buscar los valores atípicos espectrales. En general, la variabilidad espectral fue de 97 % usando 12 componentes principales y las distancias de Mahalanobis (H) desde el espectro promedio de todo el conjunto de muestras se calcularon en este hiperespacio. Las muestras se clasificaron en orden de sus valores de H y el criterio $H > 3$ se aplicó a pesar de que no se encontraron valores atípicos. La figura 4.26 muestra los resultados de las muestras de uvas en el plano definido por el primer y segundo componente principal, el cual describe 58.36 % (PC1) y 18.16 % (PC2) de la variabilidad de los datos espectrales. En esta gráfica, las diferencias entre los estados de madurez (Figura 1. a) o por variedades (figura 1. b) no son evidentes ya que las muestras se traslapan en este plano. Dado que no hubo diferencias entre estados de madurez ni tampoco por variedades, es apropiado utilizar todo el conjunto de datos para la etapa de calibración.

Por último, las calibraciones cuantitativas fueron desarrollados por regresión de mínimos cuadrados parciales modificados (MPLS) utilizando los antocianos totales o no acilados como la variable dependiente (Y) y el espectro de la uva como la variable independiente (X). Los parámetros estadísticos de las ecuaciones de calibración finales se muestran en la Tabla 4.1 donde N es el número de muestras utilizadas para obtener la ecuación de calibración después de muestras por razones químicas (criterio T). También se muestra el mejor de los diferentes tratamientos matemáticos, el intervalo de concentración, y las desviaciones estándar. El espectro promedio del mejor de los distintos espectros de los pre-tratamientos matemáticos se muestra en la figura 4.27.

La figura 4.27 muestra la comparación de los valores pronosticados contra los datos cromatográficos para antocianos totales y antocianos no acilados en la validación interna, respectivamente. Los resultados obtenidos (pendiente, coeficiente de determinación (RSQ), error estándar de predicción (SEP) y el error estándar de la predicción corregida por la tendencia (SEP (C)) en la validación interna respectivamente) para los modelos desarrollados también se pueden apreciar en la 4.27 antes mencionada.

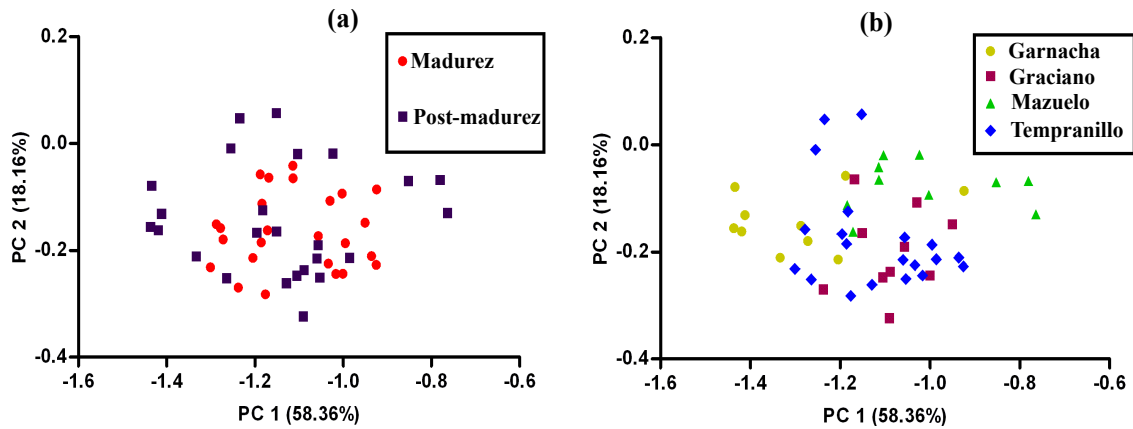


Figura 4.26: Resultados gráficos de las muestras de uvas en el plano definido por PC1 y PC2. (a) Las diferentes etapas de madurez, o (b) las diferentes variedades.

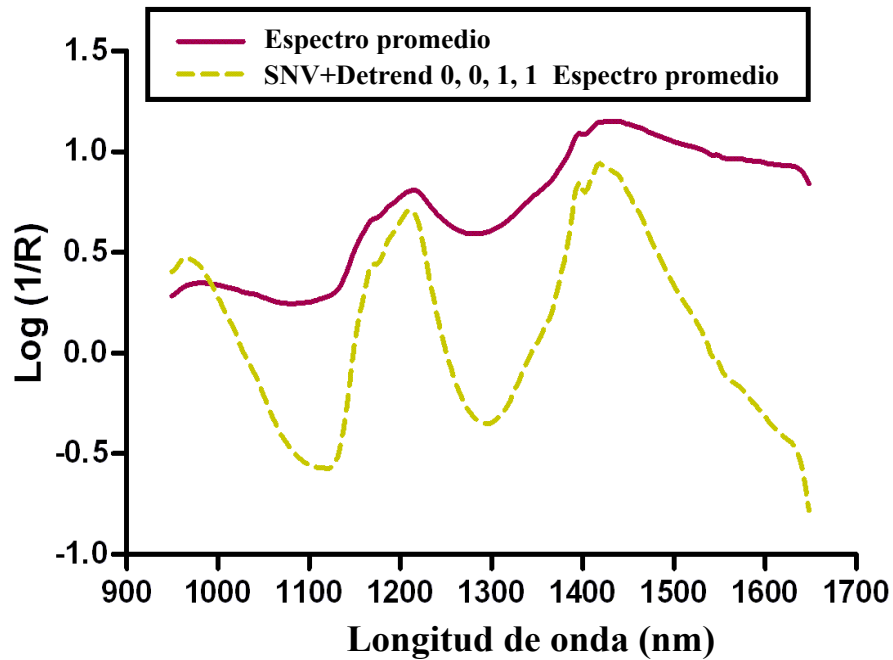


Figura 4.27: Espectro promedio y SNV-Detrend de las muestras en NIR en la región de los 950 a 1650 nm.

4.6. Implementación 1: red inalámbrica de sensores

4.6.1. Módulos para el nodo esclavo

El diseño modular de los elementos que conforman el nodo esclavo (fuente regulada, sistema mínimo, sensores y LCD) proporcionan redundancia al sistema en caso de fallo;

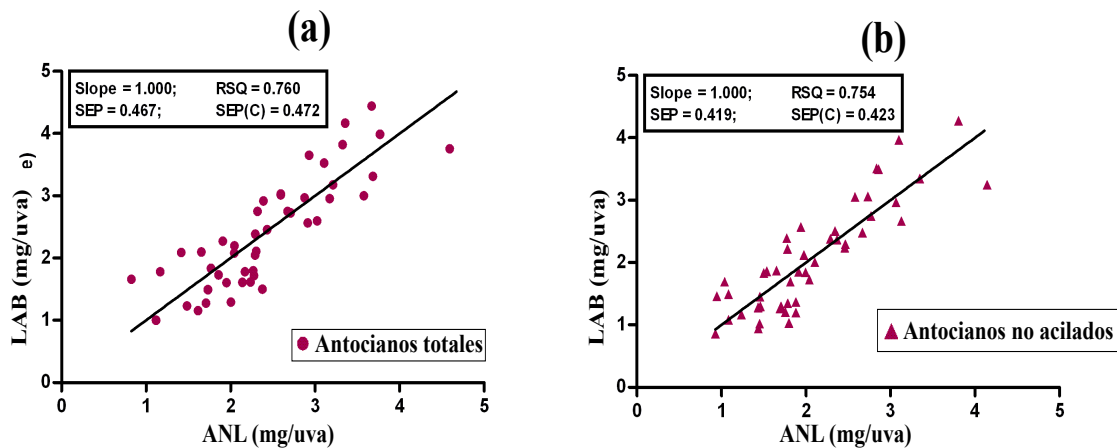


Figura 4.28: Comparación del valor de referencia del HPLC con los valores pronosticados por los modelos de imágenes hiperespectrales. (a) antocianos totales y (b) antocianos no acilados.

debido a que los módulos se pueden reemplazar de forma individual; lo cual, lo hace un sistema flexible y operativo.

En la figura 4.29 se muestra el módulo del sistema mínimo utilizado para la red de sensores. Los elementos que constituyen el módulo son los siguientes: (a) regulador de voltaje a +3.3 V; (b) energía del sistema (VCD); (c) puerto digital D; (d) regulador de voltaje a +5 V; (e) salida de voltaje regulada a +5V; (f) salida del puerto serial (Tx y Rx); (g) base para radios Xbee y radio; (h) puerto digital B; (i) puerto análogo/digital C; (j) voltajes de referencia; (k) Microcontrolador Atmega328; (l) boton de reset.

Por otro lado, en la figura 4.30 se muestra el (1) módulo de los sensores y (2) el sensor de humedad relativa (HM1500LF). De la figura 4.30 (1) los elementos que lo conforman son: (a) sensor de temperatura (LM35); (b) fotoresistencia; (c) conexiones hacia el sensor de humedad relativa; (d) energía del sistema (+5V); (e) señales de salida hacia el módulo del sistema mínimo. De la figura 4.30 (2) los elementos son: (a) sensor HM1500LF de humedad relativa y (b) señales de entrada y salida que se conectan al módulo de los sensores.

En la figura 4.31 se muestra el módulo LCD utilizado para desplegar los datos de los sensores. Los elementos que lo conforman son los siguientes: (a) pantalla de cristal líquido (LCD); (b) energía del módulo (+5V) y (c) señales de entrada, que se conectan a los puertos digitales del módulo del sistema mínimo.

La integración de los módulos, descritos previamente, se muestra en la figura 4.32. En la imagen (1) se muestra los elementos que conforman el nodo esclavo son los siguientes: (a) Módulo LCD; (b) señales de entrada y salida hacia el módulo de los sensores; (c) energía del sistema (110VCA); (d) módulo del sistema mínimo con radio Xbee; (e) fuente regulada de energía; (f) gabinete que contiene al sistema con grado

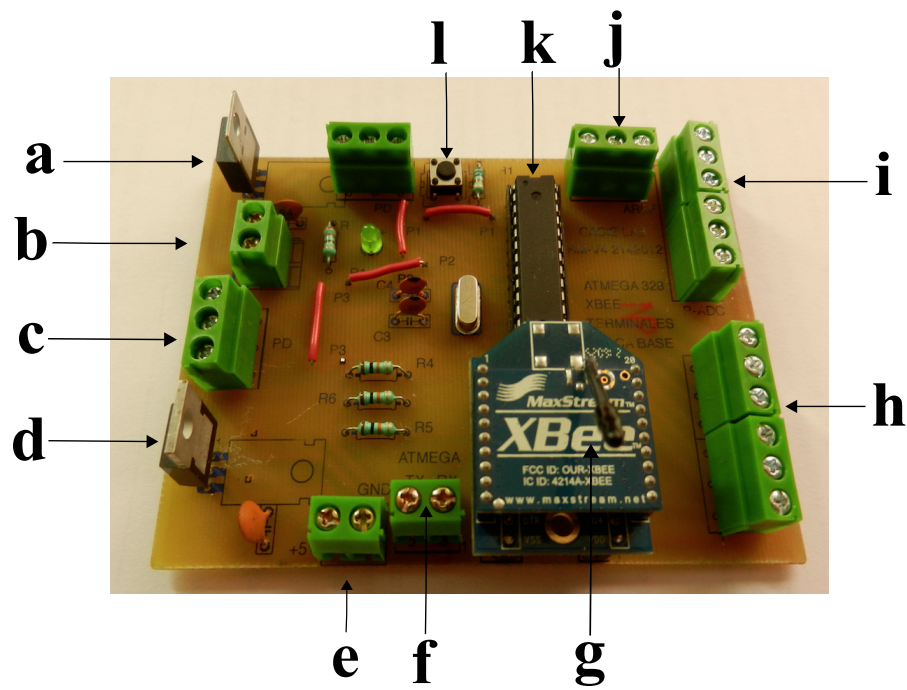


Figura 4.29: Módulo del sistema mínimo utilizado para la red de sensores.

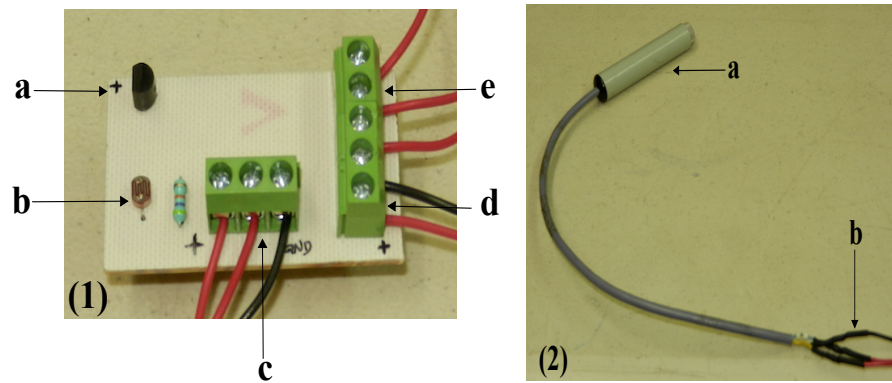


Figura 4.30: (1) Módulo de los sensores y (2) el sensor de humedad relativa .

de protección IP67 (protección fuerte contra polvo y inmersión completa y continua en agua). En la imagen (2) se muestra el sistema operando con la cubierta transparente, para poder visualizar los datos de la pantalla LCD.

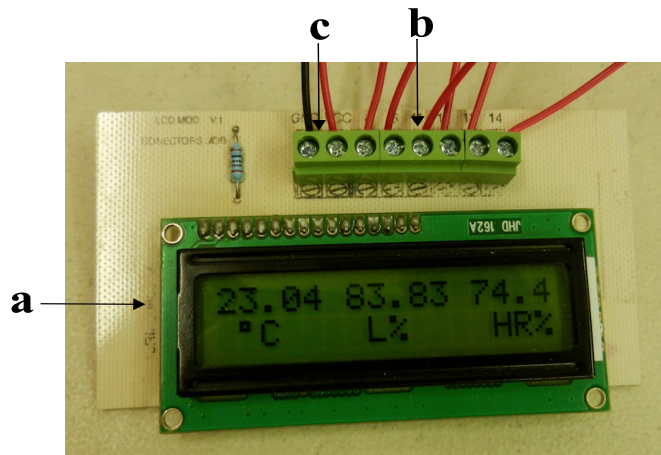


Figura 4.31: Módulo LCD.

4.7. Implementación 2: Colorímetro electrónico con sensor RGB

4.7.1. Sistema colorímetro

En la figura 4.33 se muestra el sistema colorímetro y sus elementos. Los componentes que conforman el colorímetro son los siguientes: (a) Plataforma Arduino; (b) potenciómetro para la regulación del contraste de la pantalla LCD; (c) pantalla LCD; (d) sensor RGB (TCS3200).

Por otra parte, en la figura 4.34 se muestra el estándar de colores (ROSCO) utilizado para la calibración del colorímetro, del cual se eligieron 7 colores para probar el sistema. El sistema operó de forma satisfactoria al adquirir la señal de color con el sensor RGB y con el software cargado en el microcontrolador realiza la tarea de identificar el color expuesto al sensor y presenta las lecturas en la pantalla LCD.

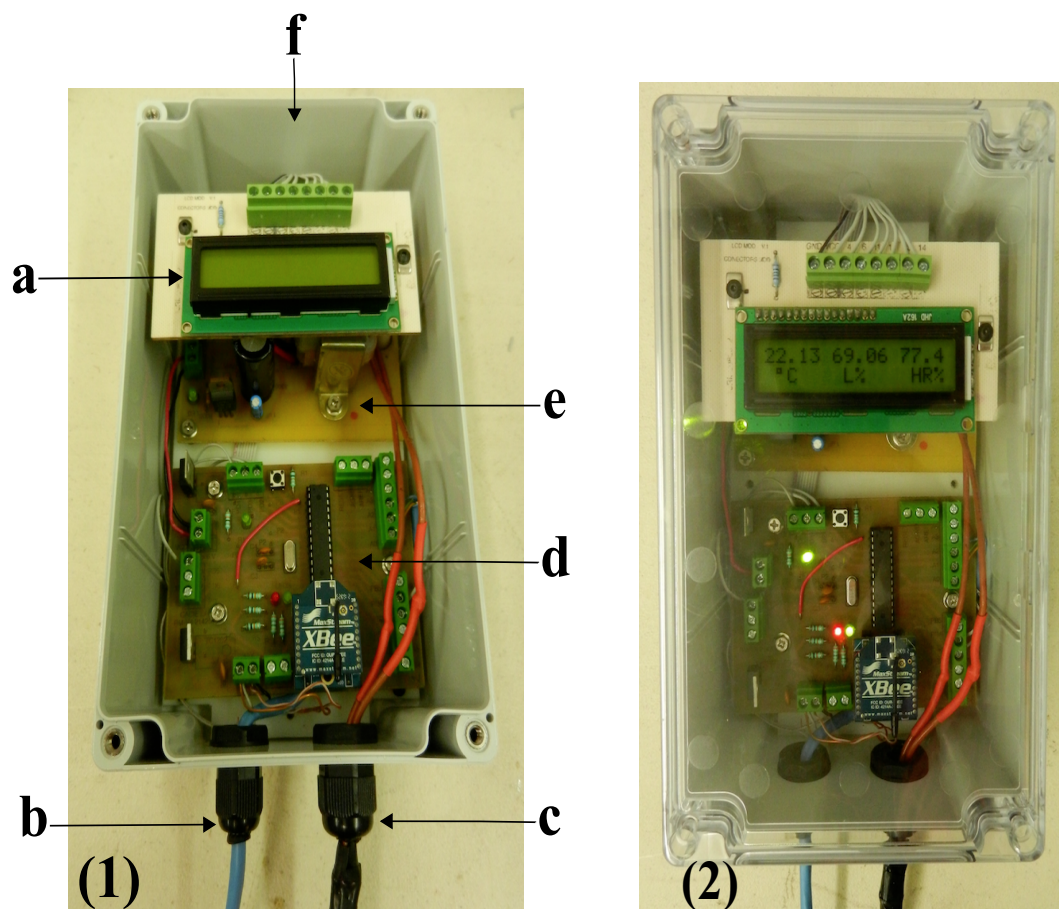


Figura 4.32: (1) Elementos del nodo esclavo y (2) sistema operando.

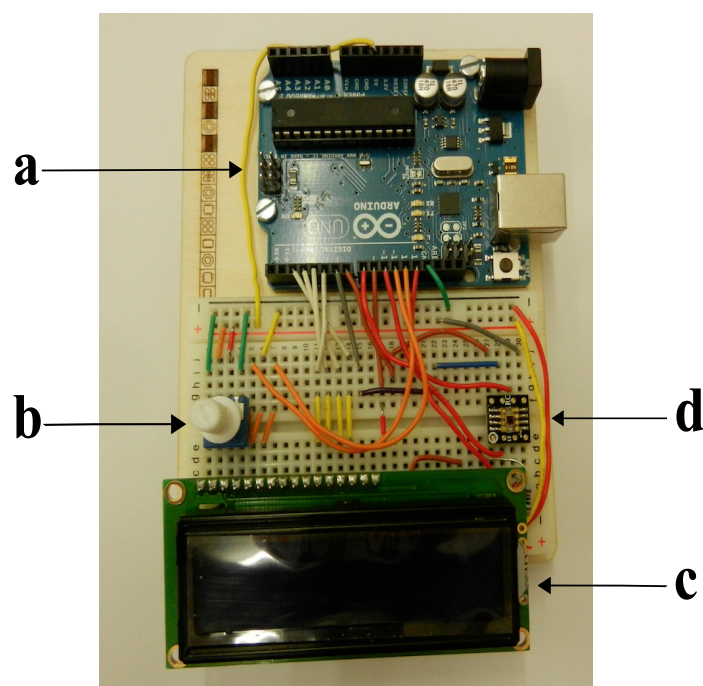


Figura 4.33: Elementos del colorímetro.



Figura 4.34: Estándar de colores para la calibración del colorímetro.

Capítulo 5

Conclusiones

La evolución de color en post-cosecha del chile Habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) cultivado en condiciones acuapónicas se puede medir utilizando un sistema de visión por computadora. Los algoritmos desarrollados en este trabajo, son capaces de segmentar, extraer y procesar la información de color del chile Habanero variedad Jaguar y Mayan K'iin a partir de imágenes digitales. La utilización del procesamiento y análisis digital de imágenes, para analizar la evolución de color del chile Habanero tiene las ventajas de ser un método confiable, objetivo y barato. Por otra parte, además de la medición del color, éste sistema de visión por computadora permitiría (con los algoritmos apropiados) la evaluación de otros atributos de calidad, tales como la forma, el tamaño, la orientación y los defectos, entre otros. Con la combinación de estos atributos, se podría implementar un sistema de control para la clasificación automática y la determinación de la calidad del chile Habanero y otros productos alimenticios.

Cabe resaltar, que el sistema con características de software libre que se desarrolló en este trabajo, se diseñó, se construyó, se probó y se evaluó por primera vez para estas variedades de chile Habanero (cultivadas en condiciones acuapónicas). El sistema incluye la implementación automática para la adquisición de imágenes digitales en una plataforma de software libre, la implementación de algoritmos para el procesamiento digital de imágenes aplicado al chile Habanero (variedad Jaguar y Mayan K'iin) y la implementación de una interfaz gráfica de usuario para el análisis automático de las imágenes, además de un sistema de monitoreo de condiciones ambientales. También, el algoritmo proporciona el acceso a los mandos de la cámara para la configuración de sus diferentes características (de acuerdo al modelo que se utilice). Lo cual, le brinda al sistema la capacidad de configuración abierta a diferencia de los sistemas comerciales, que son cerrados.

Por otro lado, durante el desarrollo del sistema de visión se mejoró la capacidad de adquisición de imágenes, desde su versión manual que alcanzó la cantidad de 900 imágenes con una tasa de muestreo de 1 imagen cada 24 horas durante 15 días para 60 ejemplares; hasta su versión automática con 17, 640 imágenes en el mismo período de tiempo con una tasa de muestreo de 1 imagen cada hora para 49 ejemplares. Así mismo, con la automatización de la etapa de adquisición de imágenes, se logró incrementar hasta

31 días el muestreo en post-cosecha. Considerando estas características de mejora, es importante mencionar la cantidad de horas hombre que se podrían evitar al utilizar un sistema de este tipo para el análisis de la evolución del color en post-cosecha de estos frutos.

Se identificaron y se ajustaron dos umbrales que separan las regiones de tonos entre las fases de madurez (verdes, rayados y maduros) con base a información previamente documentada del chile Habanero de la variedad Jaguar [97]; El primer umbral ($h_{ab} \approx 120^\circ$) separó la región entre los tonos verdes y los tonos amarillos; el segundo umbral ($h_{ab} \approx 60^\circ$) separó la región entre los tonos amarillos y naranjas. Considerando que la variedad Mayan K'iin evoluciona con características de color similares, y como no se encontró documentación relacionada, se mantuvieron los mismos umbrales para ambas variedades.

El sistema de adquisición automática de imágenes digitales desarrollado se puede utilizar, en forma general, para la adquisición imágenes de otro tipo de frutos o materiales de interés. Por otro lado, la interfaz gráfica de usuario proporciona la oportunidad de interactuar con la información del color de una forma más amigable, rápida y sencilla para el usuario; ya que despliega las imágenes de inicio y final de la evolución, los datos del color y las gráficas del diagrama de color a^*-b^* , la componentes L^* , C_{ab}^* y h_{ab} . La interfaz brinda la información del color que contribuye a la toma de decisiones para estas variedades.

La red inalámbrica de sensores proporciona conectividad y monitorización de la cabina de forma remota. Lo cual, le brinda confiabilidad al sistema debido a que se puede acceder a él, en tiempo real, desde cualquier computadora por medio de internet. En los sistemas de visión por computadora para el análisis de frutos en post-cosecha se recomienda medir y registrar las condiciones ambientales, a las que se encuentran expuesto los frutos, para monitorizar y almacenar los parámetros como la temperatura y humedad relativa, entre otros. También, se recomienda utilizar una cabina aislada, para mantener las condiciones ambientales así como de iluminación; además, de proporcionar repetibilidad a los experimentos bajo condiciones controladas.

Se ha evaluado el potencial de las imágenes hiperespectrales de infrarrojo cercano para determinar las antocianos en las uvas individuales de La Rioja. La técnica presenta un buen potencial para la detección rápida y razonablemente barata de estos compuestos en uvas individuales. Por otra parte, la heterogeneidad de los antocianos en el mismo estado de madurez se pudo evaluar utilizando ésta herramienta no-destructiva. La metodología empleada permite ordenar las uvas de acuerdo con su contenido de antocianos y las mismas muestras podrían ser utilizadas en estudios posteriores para análisis destructivos u otros propósitos.

5.1. Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro, se plantean los siguientes aspectos para mejorar el desempeño del sistema:

- La caracterización de la evolución de color en post-cosecha de otras variedades de chile Habanero (*Capsicum chinense* Jacq.).
- Realizar experimentos para establecer la correlación entre el color y la pungencia del chile. Así como, la presencia de otros compuestos químicos como los carotenoides presentes en estos frutos.
- Realizar experimentos para comparar color entre frutos madurados en planta con respecto a los que se maduran en post-cosecha. Analizar la información de color para ajustar la estimación de vida de anaquel y la calidad de los frutos.
- En conjunto con éste sistema de visión por computadora diseñar un sistema de control para la clasificación automática y la determinación de la calidad del chile Habanero y otros productos alimenticios.
- Migrar los algoritmos desarrollados a una plataforma de software libre, por ejemplo *Python*.
- Adaptar los algoritmos de procesamiento digital de imágenes para ser utilizados en un sistema embebido de hardware libre.
- Mejorar la interfaz gráfica de usuario para un manejo intuitivo y de fácil acceso a la información y procesamiento de los datos. Adaptar los códigos fuente para migrar la programación de la interfaz a una plataforma de software libre.
- Adaptar los algoritmos para su utilización en un sistema embebido. Con el fin de incrementar la velocidad de procesamiento en tiempo real de las imágenes digitales, se recomienda utilizar un arreglo de compuertas programables tipo FPGA.
- Mejorar el diseño electrónico del colorímetro e implementarlo en un circuito impreso. Optimizar el diseño de la cabina aislada, así como el control de la iluminación, para evaluar muestras sólidas y líquidas, además de adecuar el software para hacer más amigable el ajuste del sistema.

Bibliografía

- [1] ASTM. *Standards on Color and Appearance Measurement*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia. 6th edn., 2000.
- [2] Hunt, R. W. G. *Measuring Colour*. Ellis Horwood. Chichester. 3rd edn., 2001.
- [3] MacDougall, Douglas B. *Colour in food*. Woodhead Publishing Limited. First Edition. Printed in England. 378 pp. ISBN: 1 85573 590 3, 2002.
- [4] Nogales Bueno, Julio y Hernández Hierro, José Miguel y Rodríguez Pulido, Francisco José y Heredia, Francisco José. Determination of technological maturity of grapes and total phenolic compounds of grape skins in red and white cultivars during ripening by near infrared hyperspectral image: A preliminary approach. *Food Chemistry*, 152:586–591, December 2013.
- [5] Rodriguez Morales, Roberto; Sossa Azuela, Juan Humberto. *Procesamiento y Análisis Digital de Imágenes*. Alfaomega and RA-MA editorial. Impreso en México. 426 pp. ISBN: 978-607-707-223-2, 2012.
- [6] Gonzalez, Rafael; C. Woods, Richard E. *Digital Image Processing*. Pearson Education, Inc. Third Edition. Printed in the United States. 954 pp. ISBN-10: 0-13-168728-x, 2008.
- [7] Pajares Martinsanz, Gonzalo; M. de la Cruz García, Jesús. *Visión por Computador Imágenes Digitales y Aplicaciones*. Alfaomega and RA-MA editorial. Impreso en México. 764 pp. ISBN: 970-15-0804-1, 2002.
- [8] Gonzalez, Rafael; C. Woods, Richard E.; Eddins, Steven L. *Digital Image Processing using MATLAB*. McGraw-Hill. Second Edition. Printed in the United States. 738 pp. ISBN-10: 0-07-070262-4, 2010.
- [9] Hall, Ernest L. *Computer Image Processing and Recognition*. Academic Press, Inc. Printed in the United States. 584 pp. ISBN: 0-12-318850-4, 1979.
- [10] Russ, John C. *The Image Processing Handbook*. CRC Press, Springer, IEEE Press. Third Edition. Printed in the United States. 771 pp. ISBN: 0-8493-2532-3, 1998.

- [11] Jain, Ramesh; Kasturi, Rangachar; Schunck, Brian G. *Machine Vision*. McGraw-Hill. Printed in the United States. 549 pp. ISBN: 0-07-032018-7, 1995.
- [12] Cuevas, Erik; Zaldívar, Daniel y Pérez, Marco. *Procesamiento Digital de Imágenes usando Matlab Simulink*. Alfaomega and RA-MA editorial. Impreso en México. 816 pp. ISBN: 978-607-707-030-6, 2010.
- [13] Lee, W. S. and Alchanatis, V. and Yang, C. and Hirafuji, M. and Moshou, D. and Li, C. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(1):2–33, 2010.
- [14] Santos Gomes, Juliana Freitas and Leta Rodrigues, Fabiana. Applications of computer vision techniques in the agriculture and food industry: a review. *European Food Research and Technology*, 235(6):989–1000, October 2012.
- [15] Stagakis, S. and González-Dugo, V. and Cid, P. and Guillén-Climent, M. L. and Zarco-Tejada, P.J. Monitoring water stress and fruit quality in an orange orchard under regulated deficit irrigation using narrow-band structural and physiological remote sensing indices. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71:47–61, July 2012.
- [16] Zarco-Tejada, P. J. and Guillén-Climent, M. L. and Hernández-Clemente, R. and Catalina, A. and González, M. R. and Martín, P. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agricultural and Forest Meteorology*, 171-172:281–294, April 2013.
- [17] Wang, Qi and Wang, Hui and Xie, Lijuan and Zhang, Qin. Outdoor color rating of sweet cherries using computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 87:113–120, 2012.
- [18] Suprem, Abhijit and Mahalik, Nitaigour and Kim, Kiseon. A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector. *Computer Standards & Interfaces*, 35(4):355–364, June 2013.
- [19] Wu, Di and Sun, Da-Wen. Colour measurements by computer vision for food quality control: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 29(1):5–20, January 2013.
- [20] Mery, Domingo and Pedreschi, Franco and Soto, Alvaro. Automated Design of a Computer Vision System for Visual Food Quality Evaluation. *Food and Bioprocess Technology*, 6(8):2093–2108, August 2012.
- [21] Sun, Tong and Huang, Kang and Xu, Huirong and Ying, Yibin. Research advances in nondestructive determination of internal quality in watermelon/melon: A review. *Journal of Food Engineering*, 100(4):569–577, October 2010.

- [22] Rodríguez-Pulido, Francisco J. and Gordillo, Belén and Lourdes González-Miret, M. and Heredia, Francisco J. Analysis of food appearance properties by computer vision applying ellipsoids to colour data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99:108–115, November 2013.
- [23] Moreda, G. P. and Muñoz, M. A. and Ruiz-Altisent, M. and Perdigones, A. Shape determination of horticultural produce using two-dimensional computer vision ? A review. *Journal of Food Engineering*, 108(2):245–261, January 2012.
- [24] Matiacevich, Silvia and Silva, Patricia and Enrione, Javier and Osorio, Fernando. Quality assessment of blueberries by computer vision. *Procedia Food Science*, 1(Icef 11):421–425, January 2011.
- [25] Li, Peilin and Lee, Sang-heon and Hsu, Hung-Yao. Study on citrus fruit image data separability by segmentation methods. *Procedia Engineering*, 23:408–416, January 2011.
- [26] Mohamed Mansoor Roomi, S. and Jyothi Priya, R. and Bhumesh, S. and Monisha, P. Classification of mangoes by object features and contour modeling. *2012 International Conference on Machine Vision and Image Processing (MVIP)*, pages 165–168, December 2012.
- [27] Lee, Dah-jye and Member, Senior and Archibald, James K and Xiong, Guangming. Rapid Color Grading for Fruit Quality Evaluation Using Direct Color Mapping. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING*, 8(2):292–302, 2011.
- [28] Wen, Zhi-yuan and Shen, Lu-ming and Jing, Hui-ping and Fang, Kui. Color and shape grading of citrus fruit based on machine vision with fractal dimension. *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing*, pages 898–903, October 2010.
- [29] Zeng, Qingbing and Liu, Chengliang and Miao, Yubin and Fei, Shengwei and Wang, Shiping. A Machine Vision System for Continuous Field Measurement of Grape Fruit Diameter. *2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, pages 1064–1068, December 2008.
- [30] Naganur, H. G and Sannakki, S. S. Fruits Sorting and Grading using Fuzzy Logic. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology*, 1(6):117–122, 2012.
- [31] Nuske, Stephen and Achar, Supreeth and Bates, Terry and Narasimhan, Srinivasa and Singh, Sanjiv. Yield estimation in vineyards by visual grape detection. *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2352–2358, September 2011.

- [32] Gomes Santos, Juliana Freitas and Rezende Vieira, Rafaela and Rodrigues Leta, Fabiana. Colorimetric indicator for classification of bananas during ripening. *Scientia Horticulturae*, 150:201–205, February 2013.
- [33] Diccionario de la Lengua Española, (DRAE). Definición. <http://lema.rae.es/drae/?val=compacidad>, 2014.
- [34] Forgacs, Esther and Cserhati, Tibor. Colour pigments of *Trichoderma harzianum* Preliminary investigations with thin-layer chromatography â Fourier transform infrared spectroscopy and high-performance liquid chromatography with diode array and mass spectrometric detection. *Journal of Chromatography. A*, 896:61–68, 2000.
- [35] Sun, Tong and Huang, Kang and Xu, Huirong and Ying, Yibin. Research advances in nondestructive determination of internal quality in watermelon/melon: A review. *Journal of Food Engineering*, 100(4):569–577, October 2010.
- [36] Wanitchang, Jaitip and Terdwongworakul, Anupun and Wanitchang, Padungsak and Noypitak, Sirinad. Maturity sorting index of dragon fruit: *Hylocereus polyrhizus*. *Journal of Food Engineering*, 100(3):409–416, 2010.
- [37] Rodríguez-Pulido, Francisco J. and Gómez-Robledo, Luis and Melgosa, Manuel and Gordillo, Belén and González-Miret, M. Lourdes and Heredia, Francisco J. Ripeness estimation of grape berries and seeds by image analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 82:128–133, March 2012.
- [38] Wrolstad, Ronald E. and Durst, W. and Lee, Jungmin. Tracking color and pigment changes in anthocyanin products. *Trends in Food Science Technology*, 16:423–428, 2005.
- [39] Weemaes, Carla A. and Ooms, Veerle and Loey, Ann M. Van and Hendrickx, Marc E. Kinetics of Chlorophyll Degradation and Color Loss in Heated Broccoli Juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, pages 2404–2409, 1999.
- [40] Wang, Hai-hong and Sun, Da-wen. Evaluation of the functional properties of Cheddar Cheese using a computer vision method. *Journal of Food Engineering*, 49:49–53, 2001.
- [41] Wang, Hai-hong and Sun, Da-wen. Evaluation of the oiling off property of cheese with computer vision: Correlation with fat ring test. *Journal of Food Engineering*, 61:47–55, 2004.
- [42] Wang, Hai-hong and Sun, Da-wen. Evaluation of the oiling off property of cheese with computer vision: Influence of cooking conditions and sample dimensions. *Journal of Food Engineering*, 61:57–66, 2004.

- [43] ElMasry, Gamal and Sun, Da-Wen and Allen, Paul. Near-infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef. *Journal of Food Engineering*, 110(1):127–140, May 2012.
- [44] Kamruzzaman, Mohammed and ElMasry, Gamal and Sun, Da-Wen and Allen, Paul. Prediction of some quality attributes of lamb meat using near-infrared hyperspectral imaging and multivariate analysis. *Analytica Chimica Acta*, 714:57–67, March 2012.
- [45] Valous, Nektarios A and Mendoza, Fernando and Sun, Da-Wen. Emerging non-contact imaging, spectroscopic and colorimetric technologies for quality evaluation and control of hams: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(1):26–43, 2010.
- [46] Wu, Di and Sun, Da-wen and He, Yong. Application of long-wave near infrared hyperspectral imaging for measurement of color distribution in salmon fillet. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16:361–372, 2012.
- [47] Menesatti, Paolo and Costa, Corrado and Aguzzi, Jacopo. Quality evaluation of fish by hyperspectral imaging. In *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control*, pages 273–294. Elsevier Ltd, 2010.
- [48] Blasco, J. and Aleixos, N. and Gómez-Sanchís, J. and Moltó, E. Recognition and classification of external skin damage in citrus fruits using multispectral data and morphological features. *Biosystems Engineering*, 103(2):137–145, 2009.
- [49] Blasco, J. and Aleixos, N. and Cubero, S and Gómez-Sanchís, J. and Moltó, E. Automatic sorting of satsuma (Citrus unshiu) segments using computer vision and morphological features. *Computers and Electronics in Agriculture*, 66(1):1–8, 2009.
- [50] Blasco, J. and Aleixos, N. and Moltó, E. Computer vision detection of peel defects in citrus by means of a region oriented segmentation algorithm. *Journal of Food Engineering*, 81(3):535–543, August 2007.
- [51] Blanco-Vega, Dora. Synthesis, Isolation, Structure Elucidation, and Color Properties of 10-Acetyl-pyranoanthocyanins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012.
- [52] Antonious, George and Berke, Terry and Jarret, Robert. Pungency in Capsicum chinense: Variation among countries of origin. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 44(2):179–184, February 2009.
- [53] Fernández-Vázquez, Rocío S. and Stinco, Carla M. and Meléndez-Martínez, Antonio J. and Heredia, Francisco J. and Vicario, Isabel M. Visual and Instrumental Evaluation of Orange Juice Color: a Consumers’ Preference Study. *Journal of Sensory Studies*, 26(6):436–444, December 2011.

- [54] Fernández-Vázquez, Rocío S. and Stinco, Carla C. and Escudero-gilete, María L. and Meléndez-martínez, Antonio J. and S, Francisco J. Heredia and Vicario, Isabel M. Preliminary study on the utility of colour to classify orange juices attending to their processing. *Flavour*, 8124(2009):245–249, 2010.
- [55] Barbin, Douglas F. and ElMasry, Gamal and Sun, Da-Wen and Allen, Paul. Non-destructive determination of chemical composition in intact and minced pork using near-infrared hyperspectral imaging. *Food chemistry*, 138(2-3):1162–71, June 2013.
- [56] Wang, J. and Nakano, K. and Ohashi, S. and Kubota, Y. and Takizawa, K. and Sasaki, Y. Detection of external insect infestations in jujube fruit using hyperspectral reflectance imaging. *Biosystems Engineering*, 108(4):345–351, April 2011.
- [57] Sun, Da-Wen. *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control*. Elsevier Inc. Printed in United States of America. 477 pp. ISBN: 978-0-12-374753-2, 2010.
- [58] Sun, Jianxia and Cao, Xiamin and Liao, Xiaojun and Hu, Xiaosong. Comparative analyses of copigmentation of cyanidin 3-glucoside and cyanidin 3-sophoroside from red raspberry fruits. *Food Chemistry*, 120(4):1131–1137, 2010.
- [59] Cairós Barreto, Carlos Javier. *Espectroscopia de Imagen en el Infrarrojo Próximo Caracterización Instrumental y Aplicación al Análisis de Productos Sólidos*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona, España, 2009.
- [60] Hernández Hierro, José Miguel. *Utilización de la Tecnología NIRS con Sonda de Fibra Óptica para el Control de Calidad de la Alfalfa*. PhD thesis, Universidad de Salamanca, Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Química Analítica, Nutrición y Bromatología, Salamanca, España, 2008.
- [61] Mehl, P. M.; Chen, Y. R.; Kim, M. S. and Chan, D. E. Development of hyperspectral imaging technique for the detection of apple surface defects and contaminations. *Journal of Food Engineering*, 61:67–81, 2004.
- [62] Chen, Y. R.; Chao, K. and Kim, M. S. Machine vision technology for agricultural applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2):173–191, 2002.
- [63] Kim, M. S.; Lefcourt, A. M.; Chao, K.; Chen, Y. R.; Kim, I. and Chan, D. E. Multispectral detection of fecal contamination on apples based on hyperspectral imagery: Part I. Application of visible and near-infrared reflectance imaging. *Transactions of the ASAE*, 45:2027–2037, 2002.
- [64] Shaw, R. and Manolakis, D. Signal processing for hyperspectral image exploitation. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(1):12–16, 2002.

- [65] Schweizer, S. M.; and Moura, J. M. F. Efficient detection in hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10:584–597, 2001.
- [66] Ciurczak, E.W.; Burns, D. A. *Handbook of Near-Infrared Analysis*. Marcel Dekker Inc., New York/Basel. Printed in United States of America. 2nd edition ISBN: 0-8247-0534-3, 2001.
- [67] Meléndez, M. E.; Sánchez, M. S.; Íñiguez, M.; Sarabia, L.A.; Ortiz, M.C. Psychophysical Parameters of Colour and the Chemometric Characterisation of Wines of the Certified Denomination of Origin ‘Rioja’. *Analytica Chimica Acta*, 446(1-2):157–167, November 2001.
- [68] Wheaton, Frederick W. *Acuicultura diseño y construcción de sistemas*. A.G.T. Primera edición en español. México, D.F. 704 pp., 1982.
- [69] Timmons, Michel B. *et al. Recirculating Aquaculture Systems*. Cayuga Aqua Ventures. Printed in the United States. 767 pp. ISBN: 0-9712646-1-0, 2002.
- [70] Lekang Odd-Ivar. *Aquaculture Engineering*. Blackwell Publishing. Primera edición. United Kingdom. 304 pp. ISBN : 978-1-4051-2610-6, 2007.
- [71] Stickney, R. R. *Aquaculture and Introductory Tex*. CABI Publishing. Primera edición. USA. 265 pp. ISBN: 0851990819, 2005.
- [72] Avault, James Jr. *Fundamentals of Aquaculture*. AVA Publishing. Primera edición. USA. 889 pp. ISBN:0-9649549-0-7, 1996.
- [73] Pillay T. V. R., Kutty M. N. *Aquaculture Principles and Practices*. Blackwell Publishing. Segunda edición. 624 pp. ISBN-10: 1-4051-0532-1, ISBN-13:978-1-4051-0532-3, 2005.
- [74] Pillay T. V. R. *Aquaculture and the Environment*. Blackwell Publishing. Segunda edición. United Kingdom. 196 pp. ISBN: 1-4051-0167-9, 2004.
- [75] CIE 1931. *Proceedings of the Eighth Session, Cambridge, England*. Bureau Central de la CIE, Paris., 1931.
- [76] Meléndez-Martínez, Antonio Jesús and Vicario, Isabel M. and Heredia, Francisco J. Instrumental Measurement of Orange Juice Colour: a Review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(6):894–901, April 2005.
- [77] Wyszecki, G.; Stiles W. S. *Color Science. Concepts and Methods. Quantitative Data and Formulae*. Wiley, New York., 1982.
- [78] Hutchings, J. B. *Food Colour and Appearance*. Blackie, Glasgow., 1994.
- [79] Color-es. Definición. <http://www.color-es.net/color-es/colorimetria.html>, 2014.

- [80] González Marcos, Ana; Martínez de Pisón Ascacíbar, Francisco Javier; Pernía Espinoza, Alpha Verónica; Alba Elías, Fernando; Castejón Limas, Manuel; Ordieres Mere, Joaquín; Vergara González, Eliseo. *Técnicas y Algoritmos Básicos de Visión Artificial*. Universidad de la Rioja. Primera edición. Impreso en España. 91 pp. ISBN: 84-689-9345-X, 2004.
- [81] Westland, Stephen; Ripamonti, Caterina. *Computational Colour Science using MATLAB*. John Wiley Sons Ltd. First Edition. Printed in Great Britain. 207 pp. ISBN: 0 470 84562 7, 2004.
- [82] Diccionario de la Lengua Española, (DRAE). Definición. <http://www.rae.es/recursos/diccionarios/drae>, 2014.
- [83] Normann, R. A.; Werblin, F. S. Control of retinal sensitivity. 1: Light and dark adaptation of vertebrate rods and cones. *Journal of General Physiology*, 63:37–61, 1974.
- [84] Rodieck, R. W. Visual pathways. *Annual Reviews in Neuroscience*, 2:193–225, 1974.
- [85] Hubel, D. H. *Eye, Brain and Vision*. Freeman. New York., 1988.
- [86] Zeki, S. *A Vision of the Brain*. Blackwell Scientific Publications, London., 1993.
- [87] CIE 1986. *Colorimetry*. American Society for Testing and Materials. 2nd edn. CIE publication 15.2. Commission Internationale de l'Eclairage. Vienna., 2000.
- [88] Wright, W. D. *The Measurement of Colour*. Adam Hilger. London. 5th edn., 1980.
- [89] Wright, W. D.; Wyszecki, G. *Color in Business, Science and Industry*. Wiley. New York. 3rd edn., 1975.
- [90] Berns, R. S. *Billmeyer and Saltzman's Principles of Colour Technology*. Wiley. New York. 3rd edn., 2000.
- [91] Wright, W. D. *The Measurement of Colour*. 4th edn. Van Nostrand Reinhold, London., 1969.
- [92] Guild, J. The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A230:149–187, 1931.
- [93] CIE 15:2004. *Colorimetry (Official Recommendations of the International Commission on Illumination)*. Commission Internationale de l'Eclairage, Viena, Austria, 3rd editon edition, 2004.

- [94] Menichini, F. and Tundis, R. and Bonesi, M. and Loizzo, M. and Conforti, F. and Statti, G. and Decindio, B. and Houghton, P. The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. cv Habanero. *Food Chemistry*, 114(2):553–560, May 2009.
- [95] Lawrence Jarret, Robert and Berke, Terry. Variation for Fruit Morphological Characteristics in a *Capsicum chinense* Jacq . Germplasm Collection. *HortScience*, 43(6):1694–1697, 2008.
- [96] Medina Lara, Fátima, Echevarría, Ileana and Pacheco Arjona, Ramón and Ruiz Lau, Nancy, Guzmán Antonio, Adolfo and Martínez Estevez, Manuel. Influence of Nitrogen and Potassium Fertilization on Fruiting and Capsaicin Content in Habanero Pepper (*Capsicum chinense* Jacq.). *HortScience*, 43(5):1549–1554, 2008.
- [97] Ramírez Meraz, Moisés and Arcos Cavazos, Gerardo and Mata Vázquez, Horacio and Vázquez García, Enrique. *Variedad Jaguar Chile Habanero para México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México., D.F. ISBN: 978-607-425-905-6, first edition, 2012.
- [98] Góngora Escamilla, José María. Desarrollo de una tecnología de cultivo acuapónico de tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus* L. 1758) y chile (*Capsicum chinense* Jacq.) en condiciones intensivas en sistemas de recirculación. Master's thesis, Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada, México, 2012.