



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona



DISEÑO DE UN SISTEMA DE VISIÓN POR ORDENADOR  
PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL COLOR DEL TOMATE  
(*Solanum lycopersicum* L.)



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Máster en Tecnologías Facilitadoras para la Industria Alimentaria  
y de Bioprocesos

**Autora:** Laura López Mas

**Tutores:** Gemma Hornero Ocaña

Joan Casals Missio

Septiembre 2017



## RESUMEN

La apariencia externa de los alimentos es el primer atributo en que se fijan los consumidores. El color, en particular, tiene una especial relevancia en el tomate (*Solanum lycopersicum* L.). La medida objetiva del color puede ser llevada a cabo por diversos instrumentos. Estos presentan, generalmente, un elevado coste, además de otros inconvenientes para el análisis de productos alimentarios. Por ese motivo, en los últimos años, ha aumentado el uso de los sistemas de visión por computador (SVC). Estos constan de un sistema de captación de imágenes y un software para su análisis. Este último puede ser un impedimento para algunos potenciales usuarios, ya que son escasas las herramientas computacionales sencillas para el procesado de la información y el desarrollo de software es una restricción limitante para muchos usuarios. En el caso del tomate existe un programa específico para la medida del color, sin embargo, no puede ser modificado para la incorporación de una función de la que carece: el análisis de las características externas del fruto. Por tanto, parece oportuno desarrollar una herramienta que permita analizar el color externo del tomate de manera simple, objetiva, eficaz y cuyo precio sea menor al de los instrumentos de medida tradicionales.

El objetivo principal de este trabajo es construir un SVC de bajo coste para medir el color externo del tomate. Para ello se ha diseñado un sistema de captación de imágenes y se ha desarrollado un programa, mediante el software LabVIEW, para la adquisición, procesado, análisis y almacenado de imágenes, así como un entorno gráfico sencillo para la manipulación por parte del usuario. Finalmente, se ha comprobado la utilidad del SVC mediante el estudio de un fruto de tomate.

Los primeros resultados alcanzados han sido el propio sistema de captación de imágenes, el programa para la manipulación de las mismas y la interfaz gráfica de usuario. A partir del SVC construido se ha analizado el color de diversas cartas de colores. Estas medidas han sido comparadas con las lecturas efectuadas con un sistema comercial, el colorímetro Konica Minolta CR-400, obteniéndose un error medio normalizado del SVC del 2,50 %. Demostrando este resultado la exactitud del SVC construido.

**Palabras clave:** tomate, *Solanum lycopersicum* L., visión por computador, medida del color, procesado de imagen, LabVIEW, RGB, L\*a\*b\*.



## RESUM

L'aparença externa dels aliments és el primer atribut en què es fixen els consumidors. El color, en particular, té una especial rellevància en el tomàquet (*Solanum lycopersicum* L.). La mesura objectiva del color pot ser duta a terme per diversos instruments. Aquests presenten, generalment, un elevat cost, a més d'altres inconvenients per a l'anàlisi de productes alimentaris. Per aquest motiu, en els darrers anys, ha augmentat l'ús dels sistemes de visió per computador (SVC). Aquests consten d'un sistema de captació d'imatges i un programari per a la seva anàlisi. Aquest últim pot ser un impediment per a alguns potencials usuaris, ja que són poques les eines computacionals senzilles per al processament de la informació i el desenvolupament de programari és una restricció limitant per a molts usuaris. En el cas del tomàquet existeix un programa específic per a la mesura del color, no obstant això, aquest no pot ser modificat per a la incorporació d'una funció que no incorpora: l'anàlisi de les característiques externes del fruit. Per tant, sembla oportú desenvolupar una eina que permeti analitzar el color extern del tomàquet de manera simple, objectiva, eficaç i amb un preu interior al dels instruments de mesura tradicionals.

L'objectiu principal d'aquest treball és construir un SVC de baix cost per mesurar el color extern del tomàquet. És per a això que s'ha dissenyat un sistema de captació d'imatges i s'ha desenvolupat un programa, mitjançant el programari LabVIEW, per a l'adquisició, processament, anàlisi i emmagatzemat d'imatges, així com un entorn gràfic senzill per a la manipulació per part de l'usuari. Finalment, s'ha comprovat la utilitat del SVC mitjançant l'estudi d'un tomàquet.

Els primers resultats aconseguits han estat el propi sistema de captació d'imatges, el programa per a la manipulació de les mateixes i la interfície gràfica d'usuari. A partir del SVC construït s'ha analitzat el color de diverses cartes de colors. Aquestes mesures han estat comparades amb les lectures efectuades amb un sistema comercial, el colorímetre Konica Minolta CR-400, obtenint-se un error mitjà normalitzat del SVC del 2,50 %. Demostrant aquest resultat l'exactitud del SVC construït.

**Paraules clau:** tomàquet, *Solanum lycopersicum* L., visió per ordinador, mesura del color, processat d'imatge, LabVIEW, RGB, L\*a\*b\*.

**ABSTRACT**

The external appearance of food is the first attribute in which consumers set their eyes on. The color, in particular, has a special relevance in the tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Objective color measurement can be carried out by various instruments. These, generally, have a high-price which adds to other drawbacks for the analysis of food products. For this reason, in recent years, the use of computer vision systems (CVS) has increased. These consist of an image capturing system and a software. The latter can be an impediment for some potential users, since there are few simple computational tools for information processing and the software development is a limiting restriction for many users. In the case of the tomato, there is a specific program for color measurement, however, it cannot be modified for the incorporation of a lacking function: the analysis of the external characteristics of the fruit. Therefore, it seems opportune to develop a tool that allows analyzing the external color of the tomato in a simple, objective, efficient way and with a lower price than traditional measuring instruments.

The main objective of this work is to construct a low cost CVS to measure the external color of tomato. For this purpose, an image capturing system has been designed and a program has been developed, using the software LabVIEW, for the acquisition, processing, analysis and storage of images, as well as a simple graphical environment for user manipulation. Finally, the effectiveness of the CVS has been proven by the study of a tomato fruit.

The first results achieved have been the image capturing system, the program for image manipulation and the graphical user interface. The color of various colored cards has been analyzed using the CVS. These measurements have been compared with the readings made by a commercial system, the Konica Minolta CR-400 colorimeter, obtaining a standardized average error of the CVS of 2.50 %. This result demonstrates the accuracy of the built CVS.

**Keywords:** tomato, *Solanum lycopersicum* L., computer vision, color measurement, image processing, LabVIEW, RGB, L\*a\*b\*.



**ÍNDICE**

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	8
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	9
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	10
<b>2. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	13
2.1 MUESTRAS DE COLOR .....	13
2.2 COLORÍMETRO .....	13
2.3 SISTEMA DE CAPTACIÓN DE IMÁGENES .....	13
2.3.1 Iluminación.....	13
2.3.2 Cámara .....	14
2.3.3 Ordenador .....	15
2.3.4 Diseño.....	15
2.4 DESARROLLO DEL PROGRAMA.....	16
2.4.1 Calibración espacial.....	17
2.4.2 Medida del color automática .....	18
2.4.3 Medida del color manual .....	21
2.4.4 Captura de imágenes.....	22
2.4.5 Obtención de dimensiones .....	23
2.4.6 Salir.....	25
2.5 VALIDACIÓN DEL DISEÑO .....	25
2.5.1 Caracterización.....	26
2.5.2 Calibración.....	29
2.5.3 Verificación.....	30
2.6 MATERIAL VEGETAL .....	30
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	31
3.1 SISTEMA DE CAPTACIÓN DE IMÁGENES .....	31
3.2 PROGRAMA E INTERFAZ GRÁFICA.....	31
3.2.1 Calibración espacial.....	31
3.2.2 Medida del color automática .....	31
3.2.3 Obtención de dimensiones .....	33
3.3 VALIDACIÓN DEL DISEÑO .....	33
3.3.1 Caracterización.....	33
3.3.2 Calibración.....	35

3.3.3	Verificación.....	36
3.4	PROPUESTAS DE MEJORA .....	38
3.4.1	Sistema de captación de imágenes .....	39
3.4.2	Programa .....	39
3.5	COSTE ECONÓMICO DEL SISTEMA .....	39
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	42
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	43
	<b>ANEXOS</b> .....	47
	<b>ANEXO A</b> .....	47
	<b>ANEXO B</b> .....	48
	<b>ANEXO C</b> .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructura del sistema de captación de imágenes con todos sus componentes.....	15
<b>Figura 2.</b> Menú de inicio del programa en LabVIEW.....	17
<b>Figura 3.</b> Captura de pantalla del apartado ‘calibración espacial’. En verde, la recta trazada por el usuario.....	18
<b>Figura 4.</b> Detección del contorno del tomate.....	19
<b>Figura 5.</b> Representación de las 9 regiones, en azul, donde se va a realizar la medida del color. ....	19
<b>Figura 6.</b> Captura de pantalla del apartado ‘medida del color automática’.....	20
<b>Figura 7.</b> Captura de pantalla del apartado ‘medida del color manual’. En verde, el cuadrado seleccionado por el usuario. ....	22
<b>Figura 8.</b> Captura de pantalla del apartado ‘capturar imágenes’.....	23
<b>Figura 9.</b> Capturas de pantalla del proceso realizado para la obtención de las medidas del tomate. a) Imagen real, b) Escala de grises, c) Aumento del contraste y disminución del brillo, d) Binarización y e) Operador morfológico de cierre.....	24
<b>Figura 10.</b> Captura de pantalla del apartado ‘obtención de dimensiones’.....	24
<b>Figura 11.</b> Esquema del proceso de validación (caracterización, calibración y verificación) del SVC desarrollado, utilizando como referencia el colorímetro comercial Konica Minolta CR-400. ....	26
<b>Figura 12.</b> Representación en 3D de los espacios de color (a) RGB y (b) CIE $L^*a^*b^*$ (Wu y Sun, 2013). ....	27
<b>Figura 13.</b> Representación de la diferencia entre los valores medidos con el SVC ( $L_{SVC}^*$ , $a_{SVC}^*$ , $b_{SVC}^*$ ) y con el colorímetro ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ ) de las muestras de la ‘fracción 1’. a) Componente $L^*$ , b) Componente $a^*$ y c) Componente $b^*$ . ....	34
<b>Figura 14.</b> Recta de calibración de la componente $L^*$ obtenida a partir de las medidas del SVC y el colorímetro Konica Minolta CR-400 en las muestras del color de la ‘fracción 2’. ....	35
<b>Figura 15.</b> Rectas de calibración de las componentes (a) $a^*$ y (b) $b^*$ obtenidas a partir de las medidas del SVC y el colorímetro Konica Minolta CR-400 en las muestras del color de la ‘fracción 2’.....	36
<b>Figura 16.</b> Representación de la diferencia entre los valores estimados con el modelo de regresión lineal ( $\hat{L}^*$ , $\hat{a}^*$ , $\hat{b}^*$ ) y los medidos con el colorímetro ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ ) de las muestras de la ‘fracción 1’. a) Componente $L^*$ , b) Componente $a^*$ y c) Componente $b^*$ .....	37
<b>Figura 17.</b> Función y parámetros utilizados para la detección automática del contorno del tomate.....	47
<b>Figura 18.</b> Imagen original a ser procesada. ....	48
<b>Figura 19.</b> Función utilizada para la extracción de los planos de color. ....	48
<b>Figura 20.</b> Función para la modificación del contraste y del brillo y los valores usados. ....	49
<b>Figura 21.</b> Umbral escogido para la binarización de la imagen. ....	49
<b>Figura 22.</b> Valores del operador morfológico de cierre usado. ....	50
<b>Figura 23.</b> Función utilizada para la obtención de las características físicas.....	50



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ventajas de los sistemas de visión por ordenador.....	11
<b>Tabla 2.</b> Limitaciones de los sistemas de visión por ordenador. ....	12
<b>Tabla 3.</b> Características técnicas del tubo LED Philips MAS LEDtube 600 mm 9W 865 T8 RS....	14
<b>Tabla 4.</b> Nomenclatura usada en la Figura 11.....	26
<b>Tabla 5.</b> Resultados de la medida del color automática realizada con el SVC.....	31
<b>Tabla 6.</b> Comparativa del tiempo de análisis del color de una muestra, realizado a partir de 9 medidas, entre el SVC y el colorímetro Konica Minolta CR-400. ....	32
<b>Tabla 7.</b> Error medio normalizado de cada parámetro y del conjunto calculado a partir de $L_{SVC}^*$ , $a_{SVC}^*$ , $b_{SVC}^*$ y $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ .....	35
<b>Tabla 8.</b> Error medio normalizado de cada parámetro y del conjunto calculado a partir de $\hat{L}^*$ , $\hat{a}^*$ , $\hat{b}^*$ y $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ .....	38
<b>Tabla 9.</b> Precio de los componentes usados para la construcción del prototipo del SVC. ....	40
<b>Tabla 10.</b> Comparativa entre las características del ordenador portátil Asus T100TAM, el ordenador compacto LattePanda y los requerimientos mínimos del programa LabVIEW con el módulo <i>Vision Development Module</i> (VDM). ....	41
<b>Tabla 11.</b> Comparativa entre los colores medidos con el colorímetro y el SVC antes y después de ser calibrado.....	51

## 1. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es el segundo cultivo hortícola con más superficie cultivada en el mundo (5 Mha). En el período 2004-2014 su producción ha crecido desde 128 Mt hasta 170 Mt, lo que supone un incremento de casi el 33 % (FAO, 2017). Este aumento de producción ha ido asociado a una intensa actividad de investigación con el objetivo de mejorar el rendimiento y los parámetros de calidad.

Uno de los criterios que determinan las preferencias de los consumidores es la apariencia externa de los alimentos, ello es debido a que es el primer atributo en que estos se fijan a la hora de realizar el proceso de decisión de compra (Kays, 1991). Los consumidores evalúan la apariencia de los alimentos considerando aspectos tales como el tamaño, la forma, la ausencia de defectos y el color (Costa *et al.*, 2011). En particular, este último atributo, así como su uniformidad, tienen una especial relevancia en el tomate (Darrigues *et al.*, 2008), pues proporciona información sobre la frescura, la madurez, la apetencia y la inocuidad (McCaig, 2002). Por este motivo los agentes de la cadena de comercialización clasifican los frutos de tomate en función de su apariencia externa, especialmente, del color. El aumento de la producción ha comportado, pues, un incremento significativo en las necesidades de clasificación de los frutos, así como el desarrollo de métodos de caracterización más eficientes.

Los estudios del color tienen especial interés en el área de la agronomía, en la que se buscan descriptores, objetivos y sistemáticos, de los rasgos de las plantas para estudiar los efectos genéticos y ambientales sobre la calidad de los productos. Entre estos descriptores, se encuentra el color del fruto, así como otras características fenotípicas relevantes para el estudio de la morfología del tomate (Heuvelink, 2005). La clasificación en base al color y, en general, el análisis del color, suelen estar destinados a fines comerciales. Prueba de ello son las líneas de clasificación de productos hortícolas según unos estándares del color, donde aquellos productos con coloraciones defectuosas son descartados o utilizados para otros fines. Este análisis también es usado para el empaquetado de productos con colores similares en un mismo lote (Cubero *et al.*, 2011), así como para medir el cambio de color después de la cosecha, de los tratamientos poscosecha o del procesado.

La medida del color puede realizarse de dos maneras: mediante la evaluación visual o a través de técnicas instrumentales. En el primer caso, la evaluación es llevada a cabo por inspectores entrenados. Esta consiste en observar el color de una muestra y compararlo con una referencia, generalmente una paleta de colores, hasta encontrar el que más se le ajusta. Esta metodología permite obtener descripciones cualitativas del color (Meléndez-Martínez *et al.*, 2005). A pesar de que la visión humana ofrece la ventaja de ser bastante robusta frente a cambios de iluminación, la percepción del color es subjetiva y presenta una elevada dificultad en la evaluación de alimentos con colores heterogéneos. Aparte de ser una tarea laboriosa, repetitiva, tediosa que no permite evaluar grandes colecciones de muestras, además de resultar costosa a nivel económico (Wu y Sun, 2013) y temporal (León *et al.*, 2006).

Es por estos inconvenientes y limitaciones que se han desarrollado herramientas más eficaces que permiten realizar esta tarea de manera objetiva y cuantitativa, como espectrofotómetros, espectroradiómetros y colorímetros (Wu y Sun, 2013). Estos últimos son los más utilizados para medir el color de los alimentos (Pathare *et al.*, 2013). Entre las principales ventajas que

ofrecen los colorímetros, además de ser portátiles, es su facilidad de uso e interpretación de los datos del color (Pathare *et al.*, 2013), así como la exactitud de sus medidas (Padrón *et al.*, 2012). Por contra, el mayor inconveniente que presentan es el coste de adquisición, así como el de reparación y sustitución de piezas (Goñi y Salvadori, 2017). Actualmente (año 2017), el colorímetro Konica Minolta CR-400 tiene un coste de unos 7500 €. Otra de las desventajas es la necesidad de contacto físico entre el instrumento y la muestra, así como la reducida área de medida. Ello implica realizar múltiples medidas para obtener un mapa de la distribución del color en la muestra, lo que demanda una gran cantidad de tiempo (Yam y Papadakis, 2004).

Es por lo mencionado con anterioridad que, en los últimos años, para sustituir o complementar las técnicas de medida del color tradicionales –colorímetros o jueces entrenados– se han desarrollado nuevos métodos de medida del color (Wu y Sun, 2013). Una de estas técnicas, cuyo uso en la industria alimentaria ha ido aumentando, son los sistemas de visión por computador (SVC) (Cubero *et al.*, 2011; Girolami *et al.*, 2013; Goñi y Salvadori, 2017). La visión por computador es una técnica que se vale de un ordenador para extraer e interpretar automáticamente información sobre un objeto a partir de una imagen (Santos y Rodrigues, 2012). Un SVC consta de un sistema de captación de imágenes y un software para su análisis. El sistema de captación, generalmente, está constituido por un sistema de iluminación, una cámara digital, un ordenador y un monitor (Abdullah, 2016).

Entre las principales ventajas que exhiben los SVC (**Tabla 1**) se encuentra la capacidad de captar el color de toda la superficie del alimento (León *et al.*, 2006), proporcionando medidas objetivas (Patel *et al.*, 2012), cuantitativas, exactas (Balaban y Odabasi, 2006) y precisas, además de ser sistemas versátiles que no requieren de tratamiento previo de la muestra ni de contacto con el alimento (Wu y Sun, 2013), y todo ello a un precio asequible (Yam y Papadakis, 2004). En lo que respecta a los inconvenientes (**Tabla 2**) están la necesidad de calibrar el sistema y de proporcionar una iluminación consistente (Wu y Sun, 2013), así como las escasas herramientas computacionales simples para el procesado (Goñi y Salvadori, 2017) y la inexistencia de un método óptimo para la extracción de características de la imagen (Santos y Rodrigues, 2012), siendo, en ocasiones, difícil la separación de los objetos con el fondo (Gümüs *et al.*, 2011) y la distinción entre los defectos y los órganos vegetales (Cubero *et al.*, 2011).

**Tabla 1.** Ventajas de los sistemas de visión por ordenador.

Ventajas	Referencia
Consistente, eficiente, rentable	Lu <i>et al.</i> , 2000
Versátil, asequible	Yam y Papadakis, 2004
Registro permanente de la imagen para análisis futuros	Briones y Aguilera, 2005
Medidas cuantitativas, exactas, flexibles, repetibles	Balaban y Odabasi, 2006
Análisis del color de toda la superficie del alimento	León <i>et al.</i> , 2006
Más fiable y objetivo que la visión humana	Cubero <i>et al.</i> , 2011
No destructivo, económico, higiénico, coherente, objetivo	Patel <i>et al.</i> , 2012
Estimación del color global de la muestra y de su heterogeneidad	Girolami <i>et al.</i> , 2013
Sin contacto, no invasivo, preciso, sin tratamiento previo de la muestra	Wu y Sun, 2013

**Tabla 2.** Limitaciones de los sistemas de visión por ordenador.

<b>Limitaciones</b>	
Distinción entre defectos y órganos vegetales –cálices, tallos o pedúnculos–	Cubero <i>et al.</i> , 2011
Separación de ciertos objetos del fondo de la imagen, evaluación de ambos lados del alimento	Gümüs <i>et al.</i> , 2011
Establecimiento de un método óptimo para la extracción de características de la imagen	Santos y Rodrigues, 2012
Comparación entre estudios por la no estandarización de las medidas del color	Pathare <i>et al.</i> , 2013
Necesidad de calibración, configuración de los ajustes de la cámara e iluminación consistente	Wu y Sun, 2013
Escasas herramientas computacionales simples para el procesado de imágenes	Girolami <i>et al.</i> , 2013

Una de las limitaciones de los SVC que cabe remarcar es que, a pesar del gran número de estudios publicados, son escasas las herramientas computacionales sencillas para el procesado de la información. Este hecho condiciona su difusión, ya que el desarrollo de software es una restricción limitante para muchos usuarios potenciales (Goñi y Salvadori, 2017). En este sentido, Yam y Papadakis (2004) afirman que la mayoría de los SVC descritos en la literatura emplean algoritmos difícilmente accesibles para la mayoría de investigadores.

En el caso del tomate existe un programa específico para la medida del color y la morfología del fruto: *Tomato Analyzer* (Rodríguez *et al.*, 2010). Sin embargo, aunque su uso es gratuito para fines docentes (Brewer *et al.*, 2006), está sujeto a derechos de autor y el código fuente no se encuentra publicado, resultando imposible realizar modificaciones. Además, el programa está diseñado específicamente para analizar los parámetros internos del fruto (corte longitudinal o transversal), careciendo de la posibilidad de evaluar las características externas. Por este motivo es necesario desarrollar una herramienta que permita el análisis del color externo en el tomate, de manera simple, objetiva y eficaz.

El objetivo principal del presente trabajo es construir un sistema de visión por ordenador para medir el color externo del tomate de una manera más eficaz y económica que las técnicas instrumentales tradicionales.

Para alcanzar este objetivo general se han fijado una serie de objetivos específicos:

- Diseñar y construir un sistema de captación de imágenes de bajo coste.
- Desarrollar un programa para la adquisición, procesado, análisis y almacenado de imágenes para la obtención del color y otras características fenotípicas.
- Diseño de una interfaz gráfica sencilla para la manipulación por parte del usuario.
- Validación del sistema a partir del estudio de un caso real.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1 MUESTRAS DE COLOR

Para la validación del SVC han sido utilizadas muestras de colores obtenidas a partir de cartas de colores comerciales gratuitas. En total se han analizado 88 muestras, divididas aleatoriamente en dos grupos de 44 muestras cada uno ('fracción 1' / 'fracción 2'). El valor promedio del color de cada muestra se ha obtenido a partir de tres repeticiones.

### 2.2 COLORÍMETRO

Existen diversos patrones de referencia, cuantitativos y objetivos, del color. En la bibliografía revisada destacan dos. Cartas de colores con las coordenadas del color conocidas (p. ej. PANTONE, Munsell o X-Rite), siendo estas utilizadas en los trabajos de Yam y Papadakis (2004), Kang *et al.* (2008) y Padrón *et al.* (2012), entre otros. O bien usando mediciones realizadas previamente con un colorímetro, método empleado por León *et al.* (2006), Girolami *et al.* (2013), Xu *et al.* (2016) y otros.

En el presente trabajo se ha utilizado el colorímetro Konica Minolta CR-400 (Konica Minolta, 2013) para obtener los valores de referencia del color. Esta elección estuvo motivada, principalmente, por el elevado coste de las cartas de colores comerciales pero, sobre todo, por el hecho de que se disponía de un colorímetro sin ningún coste.

Los datos obtenidos con el colorímetro pueden ser expresados utilizando diversos espacios de color (**Apartado 2.5.1.1**), siendo el espacio CIE L\*a\*b\* el más usado para representar el color de los alimentos (León *et al.*, 2006; Mendoza *et al.*, 2006; Wu y Sun, 2013).

### 2.3 SISTEMA DE CAPTACIÓN DE IMÁGENES

Los sistemas de captación de imágenes, como ya se ha mencionado con anterioridad, generalmente constan de: un sistema de iluminación, una cámara, un ordenador, un monitor y una estructura sustentadora. A continuación, se describen cada uno de los componentes utilizados para el montaje del prototipo del sistema de captación de imágenes del presente trabajo.

#### 2.3.1 Iluminación

La iluminación es un factor importante que determina la calidad de la imagen capturada. Una buena iluminación puede mejorar la fiabilidad, reducir el tiempo, la complejidad y el coste del procesado de la imagen (Wu y Sun, 2013). Asimismo, la iluminación afecta a la sensación del color percibida, ya que, de producirse alguna variación, el color de la muestra también cambia (Meléndez-Martínez *et al.*, 2005). Es por esta razón que resulta imprescindible que la iluminación sea constante, tanto en composición espectral como en intensidad (Sangwine y Horne, 1998).

Para disponer de una iluminación constante, es imprescindible incorporar el sistema de iluminación dentro de una estructura cerrada que impida la entrada de la luz ambiente.

Además, para asegurar la constancia de la luz, es preciso seleccionar un iluminante estándar y el tipo de lámpara que debe proporcionarla.

Existen diversos iluminantes estándares definidos por la *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) (CIE, 2017). Se clasifican según su temperatura de color. En el caso particular de los alimentos, el estándar más usado, el cual corresponde a la radiación de un cuerpo negro a 6500 K, es el D65 (Mendoza *et al.*, 2006). Este estándar ha sido escogido para el presente estudio.

En lo que concierne al tipo de lámpara que va a proporcionar esa temperatura de color, existen varios tipos. Los más usados son los fluorescentes o las lámparas incandescentes. Aunque, en los últimos años, se ha extendido el uso de los LEDs (*Light-Emitting Diodes*) (Wu y Sun, 2013), puesto que ofrecen diversas ventajas, como su elevada eficiencia luminosa, su bajo consumo eléctrico (Krames *et al.*, 2007), su larga vida útil (Philips, 2017a) y su encendido casi instantáneo (Philips, 2017b). Estas ventajas de las lámparas LED han motivado su utilización en el presente trabajo. Concretamente, se ha hecho uso de dos tubos LED Philips MAS LEDtube 600 mm 9W 865 T8 RS (Philips, 2017b), cuyas características principales se encuentran en la **Tabla 3**. La elección de una marca conocida, a expensas de suponer un incremento en el coste, pretende facilitar la reproductibilidad de este trabajo.

La sujeción de cada tubo LED se ha realizado mediante una regleta de aluminio de 600 mm, la cual se halla provista de un reflector (Padrón *et al.*, 2012).

**Tabla 3.** Características técnicas del tubo LED Philips MAS LEDtube 600 mm 9W 865 T8 RS.

Característica	Valor
Código de color	865
Temperatura del color	6500 K
Flujo lumínico	1050 lm
Índice de reproducción cromática	83
Potencia	9 W
Eficiencia energética	A+
Longitud	600 mm

### 2.3.2 Cámara

De la misma manera que la selección y diseño de un sistema de iluminación adecuado es crucial para la adquisición de imágenes, también lo es la elección de la cámara.

Aunque la mayoría de la bibliografía revisada (Vidal, 2012; Girolami *et al.*, 2013; De Oliveira *et al.*, 2016; Tarlak *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2016) hace uso de cámaras profesionales con altas prestaciones y, por ende, con un elevado precio, en el presente trabajo, con el objetivo de construir un sistema de bajo coste, se ha utilizado una cámara web, o *webcam*, de la marca Trust (modelo Trino) (Trust, 2016).

Las imágenes captadas con la cámara escogida se obtienen en el espacio de color RGB (**Apartado 2.5.1.1**). Estas imágenes han sido tomadas usando la resolución máxima de la cámara (1280x720 píxeles), conectada a un ordenador portátil a través de un conector USB

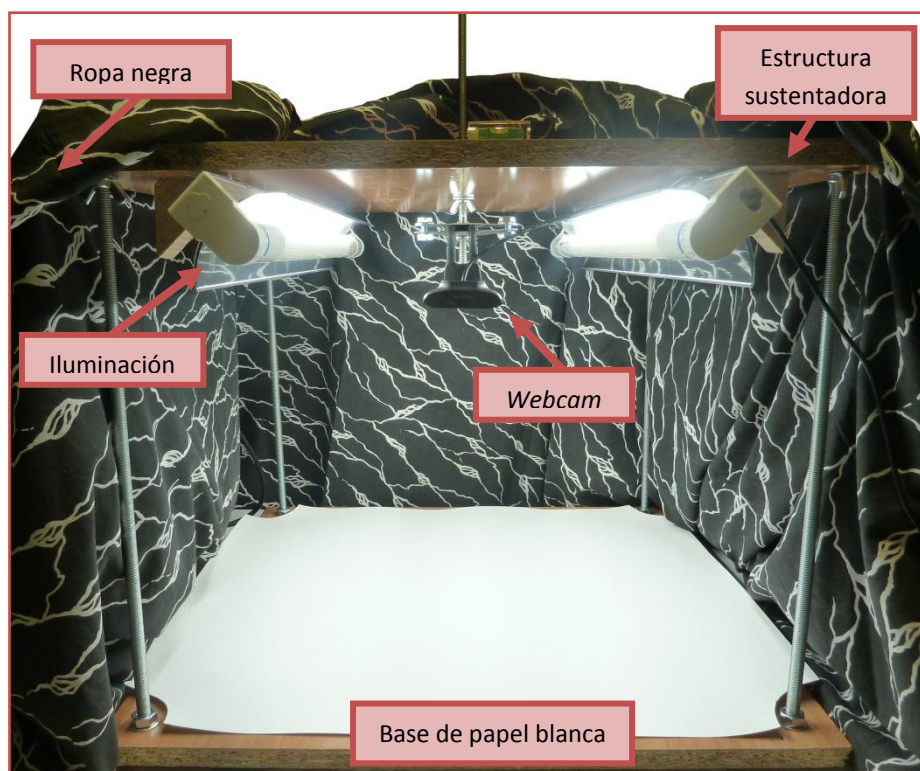
2.0. Para el almacenamiento de las imágenes se ha usado el formato de archivo PNG (*Portable Network Graphics*), libre de patentes, y que utiliza un formato de compresión no destructivo, es decir, sin pérdida de información (Relf, 2003).

### 2.3.3 Ordenador

El equipo utilizado para realizar el procesamiento, análisis y almacenamiento de las imágenes es un ordenador portátil convertible de la marca Asus, modelo T100TAM, cuyas características son: procesador Intel Atom Z3775, 2 GB de memoria RAM, 32 GB de disco duro y Windows 8.1 como sistema operativo.

### 2.3.4 Diseño

Para la colocación, tanto de la iluminación como de la cámara, se ha construido una estructura sustentadora (**Figura 1**), adaptando las propuestas realizadas previamente por Mendoza *et al.* (2006), Pedreschi *et al.* (2006), Valous *et al.* (2009), Padrón *et al.* (2012), Tarlak *et al.* (2016) y Goñi y Salvadori (2017).



**Figura 1.** Estructura del sistema de captación de imágenes con todos sus componentes.

Los elementos principales que forman esta estructura son la base y el techo, ambos de madera aglomerada reutilizada de 55x55 cm, aproximadamente. Para soportar el techo sobre la base se han colocado cuatro varillas roscadas, una en cada esquina. Estas permiten ajustar la altura del techo en función de las necesidades del usuario, proporcionando una gran versatilidad al diseño.

La iluminación se encuentra colocada en el techo. La conforman dos tubos LED, dispuestos en paralelo, provistos de una regleta de aluminio con reflector. La inclinación de las lámparas respecto a la lente de la cámara es de  $45^\circ$ , puesto que la reflexión difusa responsable del color se produce, principalmente, en este ángulo (Yam y Papadakis, 2004; Valous *et al.*, 2009). La altura de las lámparas, 35 cm respecto a la base, se ha establecido según la publicación de Mendoza *et al.* (2006).

El techo sirve, además, de sustento para la *webcam*, colocada con la lente enfocando hacia abajo. La altura de esta es de 30 cm en relación a la base, fijado según el artículo de Mendoza *et al.* (2006).

En lo que respecta a la base de madera, sobre ella se ha colocado una cartulina blanca DIN A2. El color blanco fue escogido para aumentar el contraste entre la muestra y el fondo y facilitar así el subsiguiente proceso de segmentación de la imagen.

Finalmente, antes de la realización de una medida, todo el sistema de captación de imágenes debe ser cubierto con ropa negra para evitar la entrada de la luz ambiente, siguiendo las directrices de Mendoza *et al.* (2006), Girolami *et al.* (2013) y Tarlak *et al.* (2016).

#### 2.4 DESARROLLO DEL PROGRAMA

A continuación, se describe el programa desarrollado que, juntamente con el sistema de captación de imágenes detallado con anterioridad, forman el SVC.

El diseño del programa para la manipulación de imágenes se ha realizado mediante el software LabVIEW 15.0 (NI, 2015) con el paquete *Vision Development Module 2015*. LabVIEW, acrónimo de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, permite una programación en lenguaje gráfico, denominado lenguaje G.

El programa desarrollado en este trabajo ha sido diseñado a medida para el laboratorio de mejora genética del tomate de la Fundació Miquel Agustí (Universitat Politècnica de Catalunya), pudiendo ser modificado para adaptarlo a las necesidades de cualquier otro usuario.

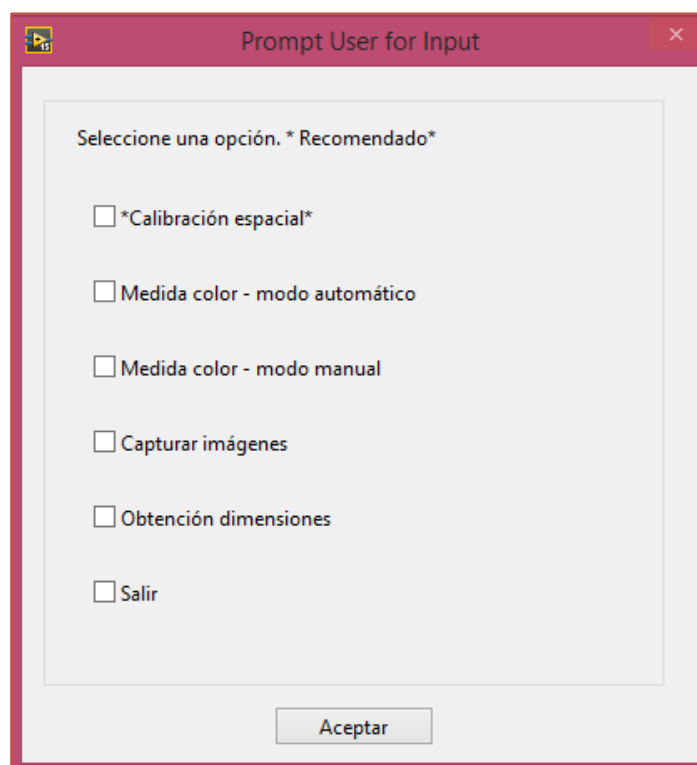
A continuación, se explica el funcionamiento de cada uno de los apartados de la interfaz gráfica de usuario de que consta el programa. Además, aunque el diseño del entrono gráfico sea parte de los resultados de este trabajo, se ha considerado que la incorporación de las capturas de pantalla de cada uno de los apartados facilita su entendimiento. En referencia al programa gráfico elaborado, este no ha sido adjuntado, principalmente, por su considerable extensión.

La organización de todas las secciones del programa es similar, aunque con pequeños matices. La imagen captada es mostrada en la pantalla, procesada y analizada para obtener los datos de interés. Finalmente, los valores obtenidos son guardados en un documento Excel así como la imagen mostrada en la pantalla. El nombre de ambos archivos puede ser escogido por el



usuario o bien se les asigna de forma automática la fecha y la hora del momento de la captura. Por último, el programa finaliza y vuelve al menú de opciones.

Cuando el usuario inicia el programa en LabVIEW aparece el menú de la **Figura 2** en la pantalla, debiendo seleccionar la acción que desea realizar. A continuación se detallan cada una de las secciones del programa desarrollado.



**Figura 2.** Menú de inicio del programa en LabVIEW.

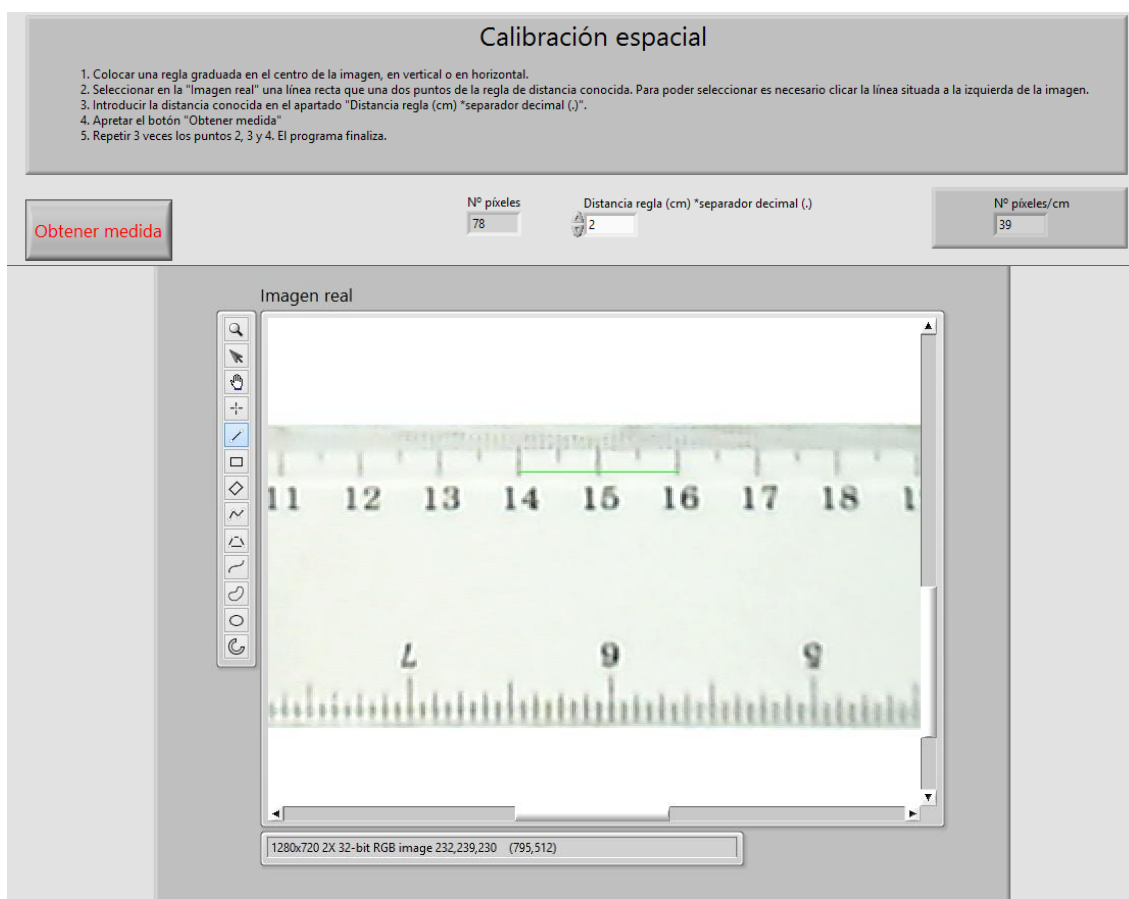
#### 2.4.1 Calibración espacial

Este apartado tiene como objetivo obtener la equivalencia entre píxeles y centímetros, correspondencia utilizada para determinar las dimensiones reales del fruto (**Apartado 2.4.5**).

Para realizar la calibración espacial es preciso colocar una regla graduada (centímetros), en el centro del campo visual de la cámara, en paralelo con el eje horizontal o vertical. Una vez el usuario visualice la regla en la ventana del programa, debe trazar una línea recta que una dos puntos de distancia conocida y, a continuación, introducir manualmente esa longitud, en centímetros y, si lo precisa, utilizar un punto como separador decimal. Este proceso debe repetirse tres veces para minimizar el error que el usuario pueda cometer, siendo, la media de estos, la equivalencia final entre píxeles y centímetros.

Es aconsejable que el usuario efectúe dicha calibración espacial. Si este prescinde de ella, se utiliza, por defecto, la relación de 39 píxeles por centímetro, habiéndose obtenido este valor de forma experimental mediante la calibración espacial descrita con anterioridad.

En la **Figura 3** se muestra la captura de pantalla del entorno de usuario de este apartado del programa.



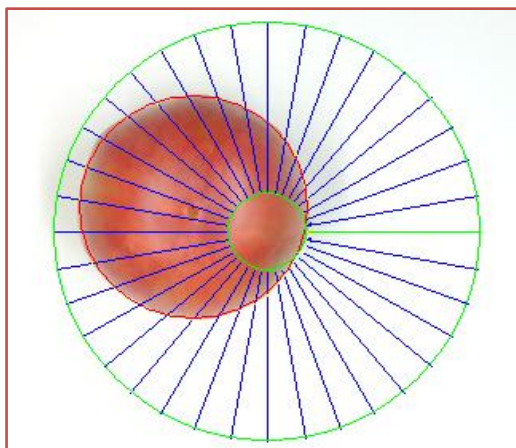
**Figura 3.** Captura de pantalla del apartado 'calibración espacial'. En verde, la recta trazada por el usuario.

En la parte superior de la **Figura 3** se encuentran descritos los pasos que debe efectuar el usuario para obtener la relación píxeles por centímetro. Como se ha dicho con anterioridad, este debe colocar una regla enfrente de la lente de la cámara y una vez la visualice en la pantalla (Imagen real), este debe trazar una línea recta que una dos puntos de distancia conocida. Para poder trazar dicha línea debe seleccionar el icono de la recta  en la galería de iconos situados a la izquierda de la 'Imagen real'. Una vez trazada una línea, en el indicador 'Nº píxeles', aparece el número de píxeles seleccionados con la recta. Posteriormente, el usuario debe introducir la distancia real de la recta dibujada en el control 'Distancia regla (cm) \*separador decimal (.)'. Y, a continuación, apretar el botón 'Obtener medida'. Después de repetir este proceso tres veces la media de estos es mostrada en el indicador 'Nº píxeles/cm'. El programa finaliza automáticamente el proceso de calibración espacial y vuelve a mostrar en pantalla el menú inicial.

#### 2.4.2 Medida del color automática

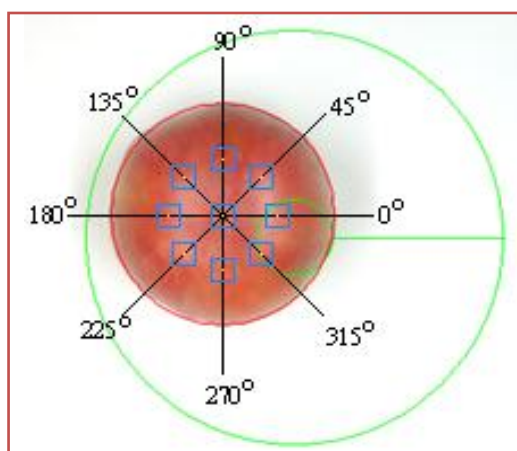
Esta parte del programa ha sido diseñada para medir automáticamente el color de la muestra. Para ello se seleccionan 9 regiones de medida situadas dentro de la superficie del tomate. La selección de estas regiones se realiza de forma automática y de la manera que a continuación se explica.

En primer lugar, el programa debe detectar en qué posición de la imagen se encuentra el tomate. Este lo identifica dibujando un círculo rojo a su alrededor. Para ello, la muestra debe colocarse en una posición concreta, dentro de un área definida por el programa mediante dos círculos concéntricos verdes que aparecen en la pantalla (**Figura 4**). En el **Anexo A** se encuentra la función y los valores de los parámetros usados en el programa para la detección del contorno del fruto.



**Figura 4.** Detección del contorno del tomate.

Una vez delimitado el círculo rojo que define los bordes del tomate, el programa calcula automáticamente las coordenadas de su centro y su radio ( $r$ ). A partir de estos datos, se divide el círculo en 8 partes iguales. A continuación, se definen 9 cuadrados cuyo valor lateral equivale a la quinta parte del radio detectado ( $r/5$ ). El centro de la primera región de medida se sitúa en el centro del círculo rojo (contorno del tomate detectado). El resto de regiones se sitúan en cada una de las 8 partes definidas, empezando por el primer cuadrante y en sentido antihorario, cada  $45^\circ$ . El centro de cada región coincide con la mitad del radio ( $r/2$ ), asegurando así que las medidas del color se producen dentro del tomate (**Figura 5**). Finalmente, de cada cuadrado, se efectúa la medida del color de todos los píxeles contenidos y se calcula el promedio. Por tanto, para cada muestra se obtienen 9 medidas del color.



**Figura 5.** Representación de las 9 regiones, en azul, donde se va a realizar la medida del color.

La captura de pantalla de la interfaz de usuario de esta sección del programa se encuentra a continuación (**Figura 6**).

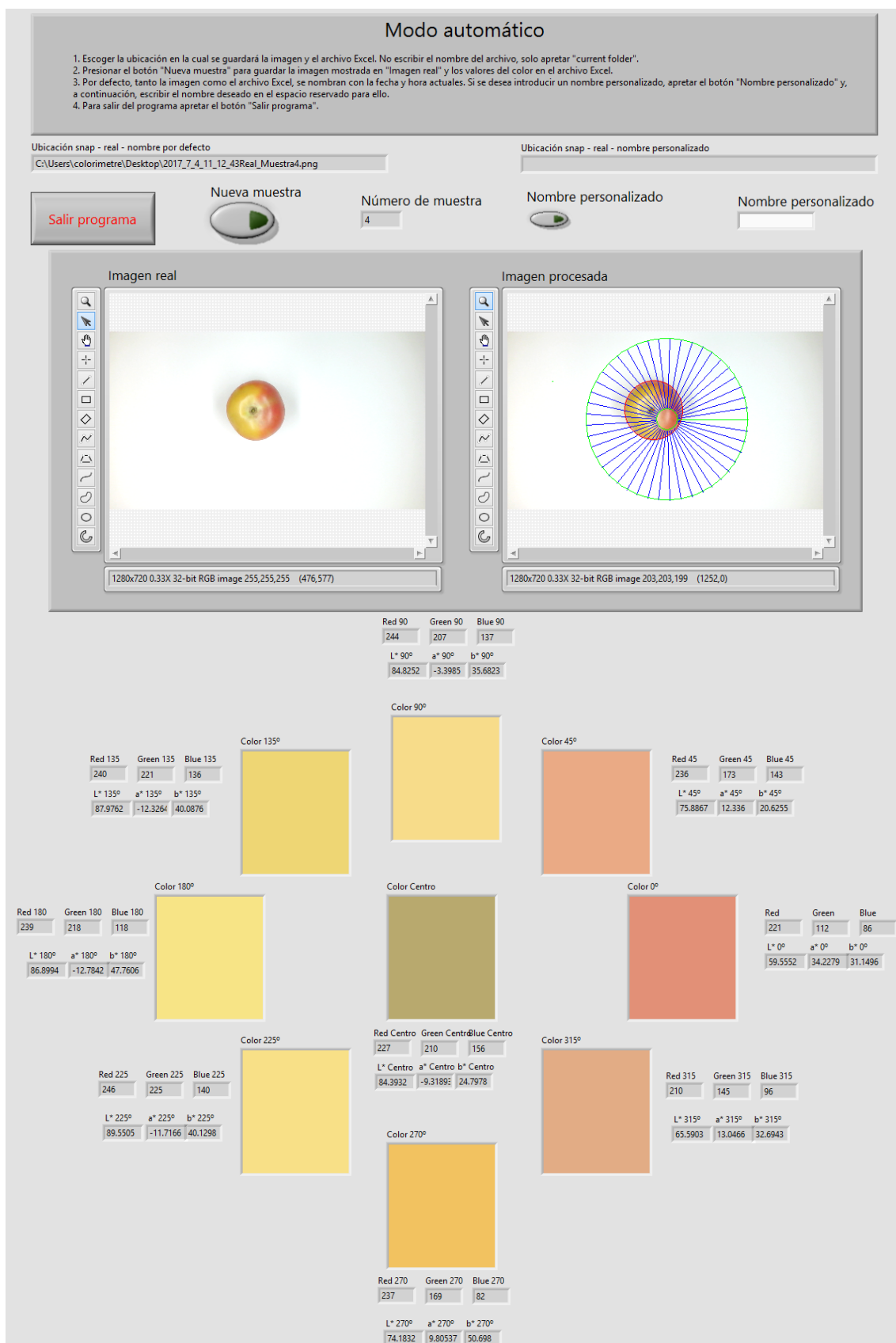


Figura 6. Captura de pantalla del apartado ‘medida del color automática’.

En la parte superior de la **Figura 6** se muestran las instrucciones que debe seguir el usuario para obtener la medida automática del color. Una vez el usuario ha colocado la muestra de tomate en el centro del campo visual de la cámara aparecen, simultáneamente, la imagen del fruto (Imagen real) y la imagen procesada (Imagen procesada). En la 'Imagen procesada' el tomate debe encontrarse dentro de los dos círculos concéntricos verdes, para que el programa detecte su contorno y lo identifique con un círculo rojo a su alrededor. Una vez localizada la posición de la muestra, en la parte inferior de la pantalla, aparece el color medio de las 9 regiones cuadradas construidas en base al radio y centro del círculo que delimita el fruto. Dichas regiones están colocadas cada 45°, intentando emular la posición de la superficie del tomate a la cual corresponden. Para cada región se muestra el color así como las coordenadas del color en el espacio RGB y CIE L\*a\*b\* (**Apartado 2.5.1.1**). La nomenclatura utilizada para hacer referencia al cuadrado central es 'Centro' y para los 8 cuadrados restantes se utiliza el ángulo de la circunferencia en el que se encuentran.

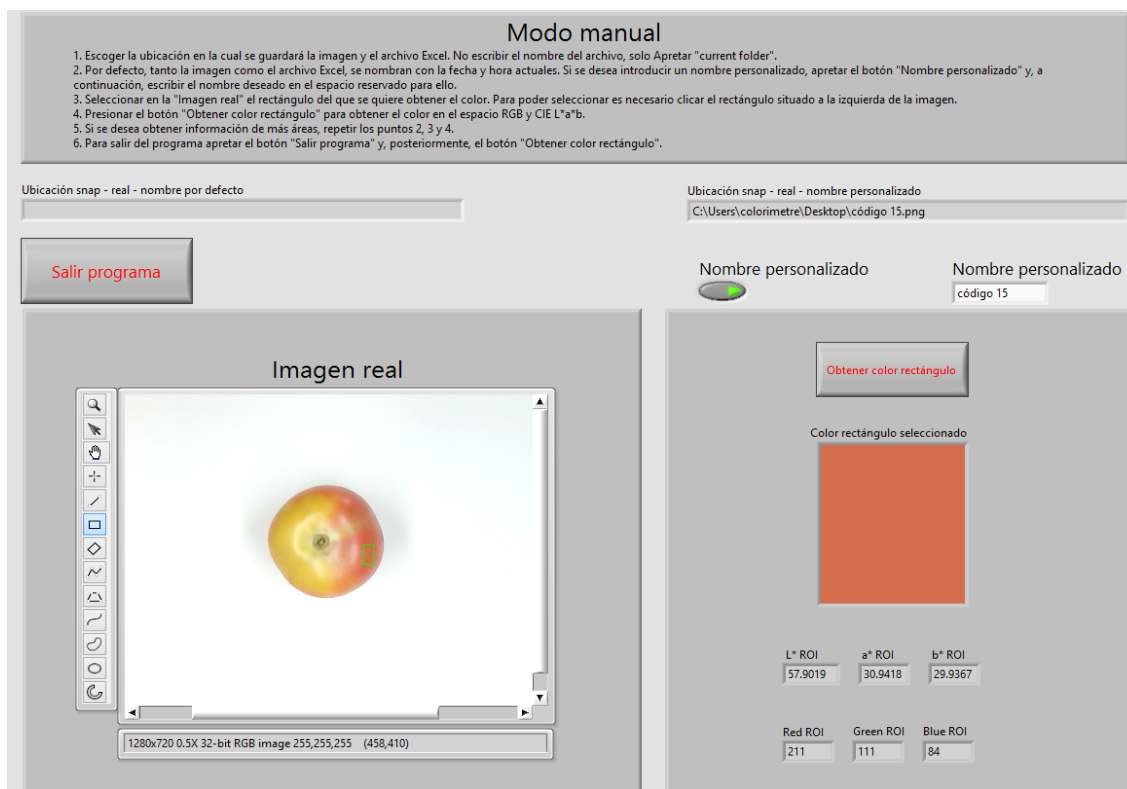
El programa va mostrando las imágenes que va tomando la *webcam* y no guarda ningún dato hasta que el usuario aprieta el botón 'Nueva muestra'. Es entonces cuando es capturada la imagen presentada en pantalla y los datos del color de los 9 cuadrados son recogidos en un fichero Excel. Si el usuario quiere dar un nombre específico a la imagen tomada, debe apretar el botón 'Nombre personalizado' y escribirlo en el control 'Nombre personalizado'. En caso contrario, la imagen es guardada automáticamente con la fecha y la hora del momento de la captura y el número de muestra expuesto en 'Número de muestra'. En los indicadores 'Ubicación snap – real – nombre por defecto' y 'Ubicación snap – real – nombre personalizado' se muestra la ubicación en el ordenador donde ha sido guardada la imagen.

El usuario puede analizar cuantos frutos quiera siempre siguiendo el procedimiento descrito con anterioridad. Cada vez que aprieta el botón 'Nueva muestra' el indicador 'Número de muestra' aumenta en uno su valor. En el único fichero Excel generado, cuyo nombre debe ser introducido manualmente por el usuario al realizar el análisis de la primera muestra, también se incorpora el 'Número de muestra'. Este hecho permite asociar la imagen guardada y los datos recogidos en el archivo Excel, puesto que tienen el mismo número de muestra, permitiendo identificar todos los frutos de manera inequívoca. Para finalizar esta sección y volver al menú inicial debe apretarse el botón 'Salir programa'.


#### 2.4.3 Medida del color manual

La finalidad de este apartado es la de dotar al usuario de cierta autonomía, permitiéndole seleccionar la zona de la imagen de la que desea obtener la medida del color.

Para realizar la medida del color manual el usuario debe escoger el área rectangular de la que quiere obtener el color. Una vez definida esta región, el proceso de medida del color es igual al descrito en la sección anterior (**Apartado 2.4.2**). La **Figura 7** muestra la interfaz de usuario para la función 'selección del color manual'.

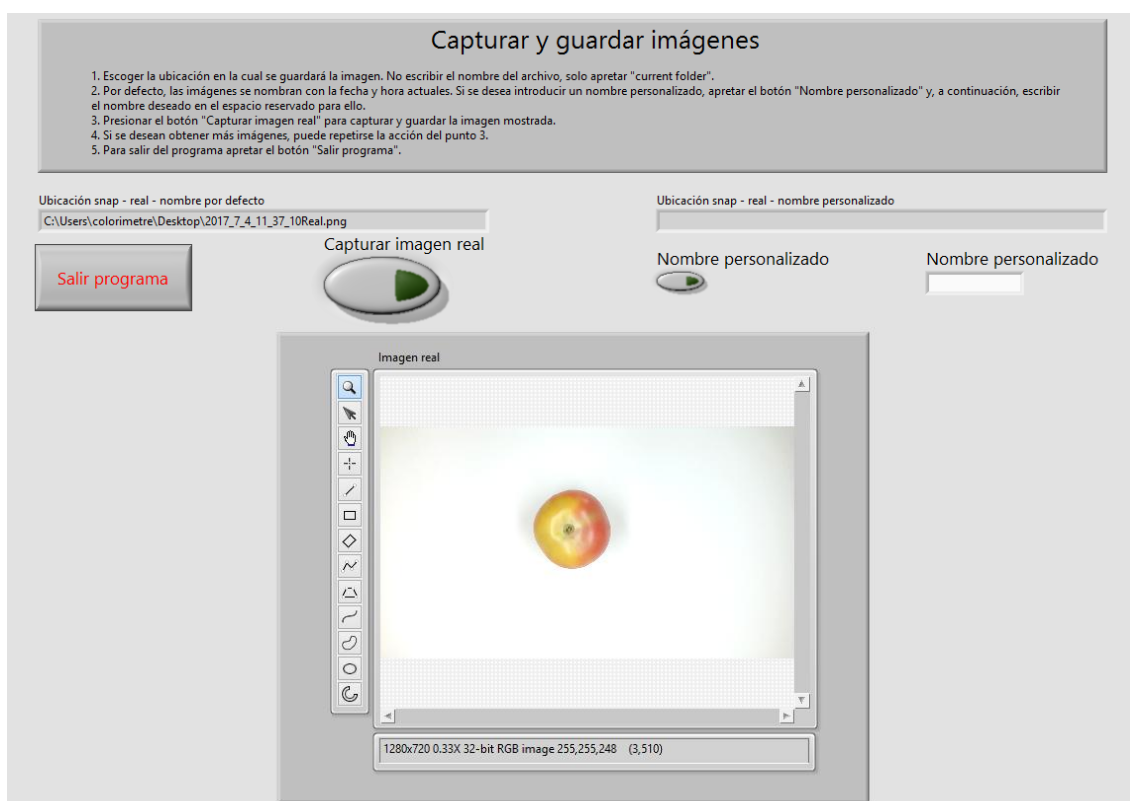


**Figura 7.** Captura de pantalla del apartado ‘medida del color manual’. En verde, el cuadrado seleccionado por el usuario.

En el encabezado del entorno gráfico de la **Figura 7** se presentan los pasos que debe seguir el usuario para medir el color de forma manual. Una vez este ha colocado el fruto delante de la lente de la cámara, la imagen captada se muestra en la ‘Imagen real’. A continuación, el usuario debe delimitar la región de la imagen de la cual quiere obtener el color. Para ello tiene que apretar el icono del rectángulo  situado en la galería de iconos a la izquierda de la ‘Imagen real’. Seguidamente, tiene que presionar el pulsador ‘Obtener color rectángulo’ y, acto seguido, justo debajo de este botón, aparece el color medio de los píxeles de la región seleccionada junto con sus correspondientes coordenadas en el espacio de color CIE  $L^*a^*b^*$  y RGB (**Apartado 2.5.1.1**). Pueden seleccionarse sucesivamente las regiones que se deseen, guardándose todos los datos relativos al color en un solo documento de Excel. El nombre de este archivo, junto con el de la imagen tomada, al igual que en la sección anterior (**Apartado 2.4.2**), puede ser escogido por el usuario o utilizarse, por defecto, la fecha y la hora de la captura. La ubicación de estos archivos se muestra o bien en el indicador ‘Ubicación snap – real – nombre por defecto’ o bien en ‘Ubicación snap – real – nombre personalizado’, dependiendo de la elección del usuario. Para finalizar este apartado y volver al menú de inicio debe apretarse el botón ‘Salir programa’.

#### 2.4.4 Captura de imágenes

La utilidad de esta sección del programa es la de proporcionar una registro gráfico sin procesar del material vegetal objeto de análisis, que puede ser transferido, almacenado o utilizado en futuras investigaciones. En la **Figura 8** se muestra la interfaz gráfica de usuario desarrollada con este objetivo.



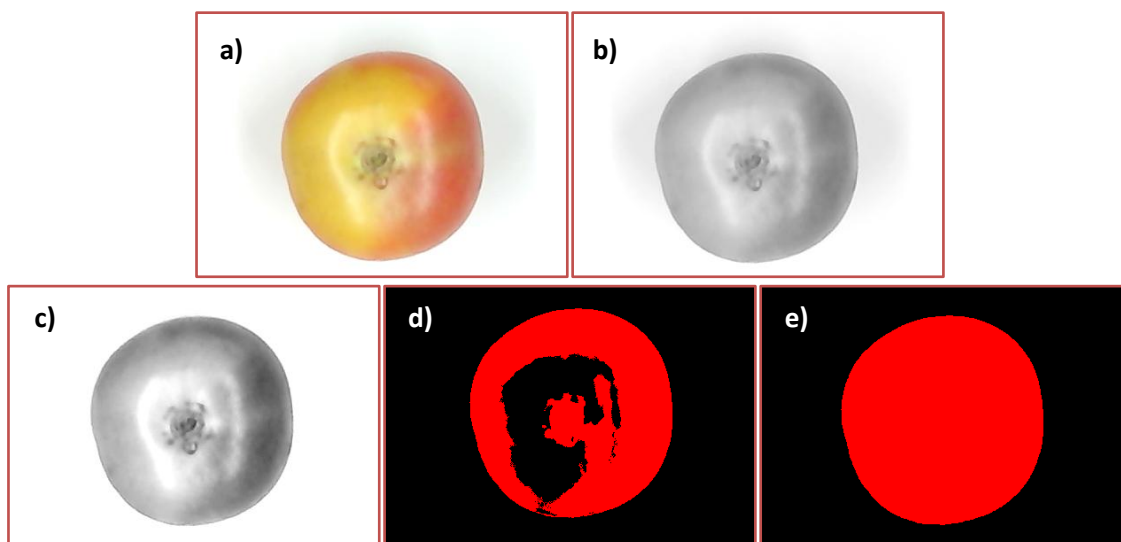
**Figura 8.** Captura de pantalla del apartado ‘capturar imágenes’.

En la parte superior de la **Figura 8** se presentan las indicaciones que debe seguir el usuario para guardar imágenes. Después de que este coloque la muestra de tomate en el centro del campo visual de la cámara, la imagen aparece en pantalla (Imagen real). El usuario puede tomar las capturas que quiera apretando el botón ‘Capturar imagen real’. De la misma manera que en los apartados anteriores, el nombre de la imagen puede ser escogido por el usuario o utilizarse, por defecto, el nombre y la hora de la captura, mostrándose la ubicación en el ordenador en el indicador ‘Ubicación snap – real – nombre por defecto’ o ‘Ubicación snap – real – nombre personalizado’. Para cerrar el programa y volver al menú inicial debe apretarse el botón ‘Salir programa’.

#### 2.4.5 Obtención de dimensiones

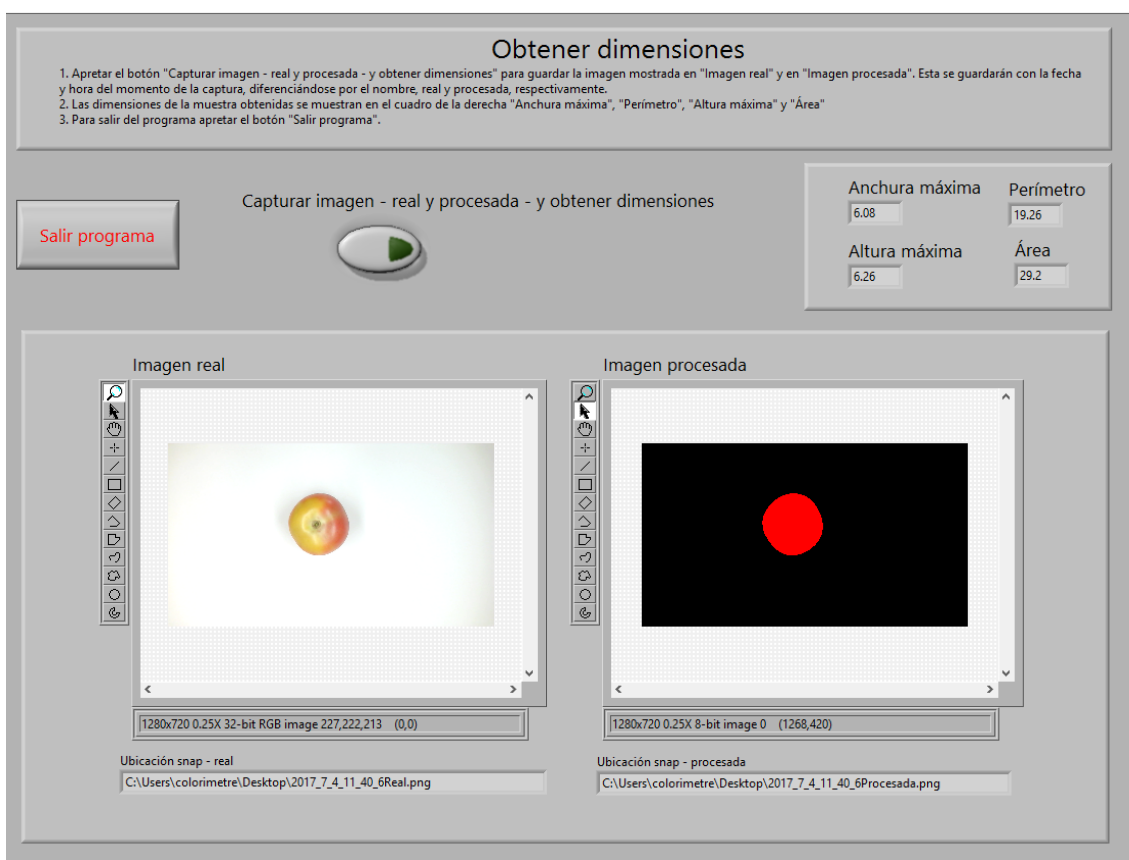
Esta opción permite adquirir información, en centímetros, sobre el área, el perímetro y la anchura y altura máximas de la muestra.

Para la adquisición de estas medidas el programa realiza, automáticamente, los pasos siguientes. A partir de la imagen captada por la cámara (**Figura 9a**), se realiza la extracción de los planos de color, obteniéndose una imagen en escala de grises (**Figura 9b**). A continuación, se incrementa el contraste y disminuye el brillo (**Figura 9c**) para difuminar la sombra de alrededor del tomate y facilitar así la posterior binarización (**Figura 9d**). Seguidamente, se aplica una transformación morfológica de cierre para eliminar las zonas oscuras (negro) aisladas dentro de la región brillante (rojo) (**Figura 9e**), todo esto sin alterar significativamente ni el área ni la forma original (NI, 2011) del tomate. Finalmente, las dimensiones de este pueden ser obtenidas.



**Figura 9.** Capturas de pantalla del proceso realizado para la obtención de las medidas del tomate. **a)** Imagen real, **b)** Escala de grises, **c)** Aumento del contraste y disminución del brillo, **d)** Binarización y **e)** Operador morfológico de cierre.

En la **Figura 10** se muestra el entorno gráfico de usuario. En el **Anexo B** se encuentran detallados los valores utilizados en el programa para la realización del procesado de la imagen y la adquisición de estas medidas.



**Figura 10.** Captura de pantalla del apartado 'obtención de dimensiones'.



En la parte superior de la interfaz de usuario **Figura 10** se muestran los pasos que tiene que realizar el usuario para obtener las dimensiones del fruto. Después de colocar la muestra de tomate en el centro del campo visual de la cámara aparecen, simultáneamente, la imagen del fruto (Imagen real) y la de la muestra procesada (Imagen procesada). Las dimensiones del tomate se presentan en los indicadores de 'Anchura máxima', 'Altura máxima', 'Perímetro' y 'Área'. Pueden analizarse, de manera sucesiva, las muestras que se deseen apretando el botón 'Capturar imagen – real y procesada – y obtener dimensiones'. Los datos relativos a las dimensiones se guardan en un fichero Excel junto con la 'Imagen real' y la 'Imagen procesada'. El nombre de todos los archivos se corresponde con la fecha y la hora de la captura. La ubicación de estos se encuentra en los indicadores 'Ubicación snap – real' y 'Ubicación snap – procesada'. El programa finaliza y vuelve al menú de inicio en presionar el botón 'Salir programa'.

#### 2.4.6 Salir

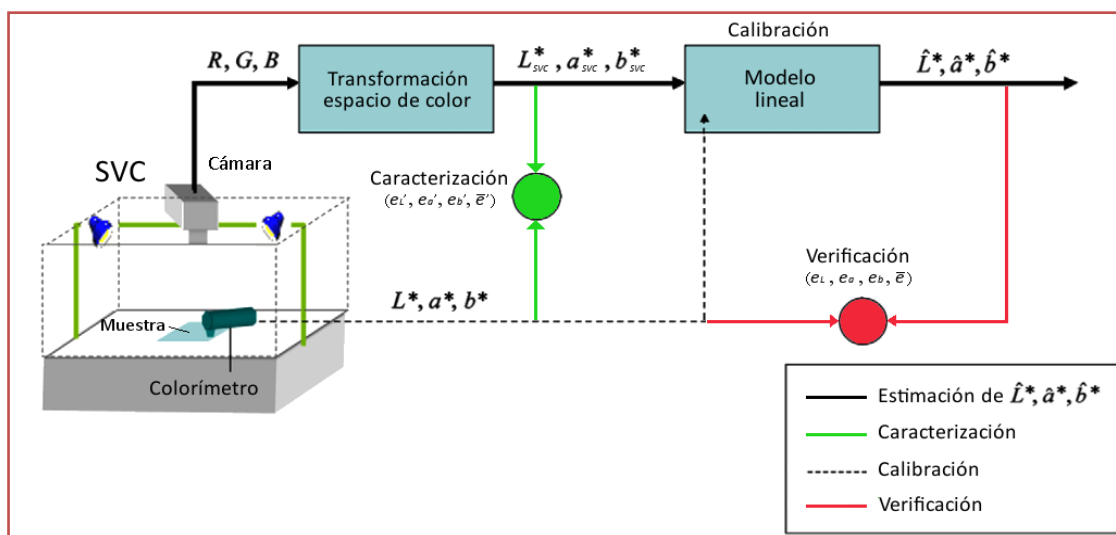
Permite finalizar el programa de forma segura.

### 2.5 VALIDACIÓN DEL DISEÑO

Una vez construido el sistema de captación de imágenes y desarrollado el programa, se ha comprobado si el diseño del SVC era válido, es decir, si servía para medir el color real de las muestras. El objetivo principal del proceso de validación es, una vez realizado, poder prescindir del colorímetro Konica Minolta CR-400 utilizado como patrón de referencia. Para facilitar la comprensión del proceso de validación se adjunta la imagen de la **Figura 11** y la terminología utilizada en la **Tabla 4**.

Primero se ha caracterizado el sistema, es decir, se ha medido el color con el SVC y el colorímetro y se han comparado los valores (**Apartado 2.5.1**). Como las medidas obtenidas con el SVC y el colorímetro diferían considerablemente, ha sido necesaria realizar la calibración del SVC (**Apartado 2.5.2**). Finalmente, se ha verificado si los valores estimados mediante el SVC, una vez calibrado, se aproximaban a los obtenidos con el colorímetro y, por tanto, si se ajustaban a la realidad (**Apartado 2.5.3**).

Es necesario precisar que, si cambia algún parámetro del sistema de visión, ya sea la altura de algún componente, la iluminación, la cámara, etc., es necesario volver a realizar todo el proceso de validación.



**Figura 11.** Esquema del proceso de validación (caracterización, calibración y verificación) del SVC desarrollado, utilizando como referencia el colorímetro comercial Konica Minolta CR-400. Modificado de León *et al.* (2006).

**Tabla 4.** Nomenclatura usada en la **Figura 11**.

Variable	Descripción
$R$	Valor de R (rojo) obtenido con el SVC
$G$	Valor de G (verde) obtenido con el SVC
$B$	Valor de B (azul) obtenido con el SVC
$L^*$	Valor de $L^*$ medido con el colorímetro
$a^*$	Valor de $a^*$ medido con el colorímetro
$b^*$	Valor de $b^*$ medido con el colorímetro
$L_{SVC}^*$	Valor de $L^*$ obtenido a partir de la transformación del espacio de color RGB
$a_{SVC}^*$	Valor de $a^*$ obtenido a partir de la transformación del espacio de color RGB
$b_{SVC}^*$	Valor de $b^*$ obtenido a partir de la transformación del espacio de color RGB
$\hat{L}^*$	Valor de $L^*$ estimado con el modelo de regresión lineal
$\hat{a}^*$	Valor de $a^*$ estimado con el modelo de regresión lineal
$\hat{b}^*$	Valor de $b^*$ estimado con el modelo de regresión lineal
$e_L'$	Error medio normalizado de $L_{SVC}^*$ con respecto a $L^*$
$e_a'$	Error medio normalizado de $a_{SVC}^*$ con respecto a $a^*$
$e_b'$	Error medio normalizado de $b_{SVC}^*$ con respecto a $b^*$
$\bar{e}'$	Error medio normalizado conjunto de $L_{SVC}^*$ , $a_{SVC}^*$ , $b_{SVC}^*$ respecto a $L^*$ , $a^*$ , $b^*$
$e_L$	Error medio normalizado de $\hat{L}^*$ con respecto a $L^*$
$e_a$	Error medio normalizado de $\hat{a}^*$ con respecto a $a^*$
$e_b$	Error medio normalizado de $\hat{b}^*$ con respecto a $b^*$
$\bar{e}$	Error medio normalizado conjunto de $\hat{L}^*$ , $\hat{a}^*$ , $\hat{b}^*$ respecto a $L^*$ , $a^*$ , $b^*$

### 2.5.1 Caracterización

Para la caracterización del sistema se ha medido el color de las muestras de la 'fracción 1' con el SVC y el colorímetro.

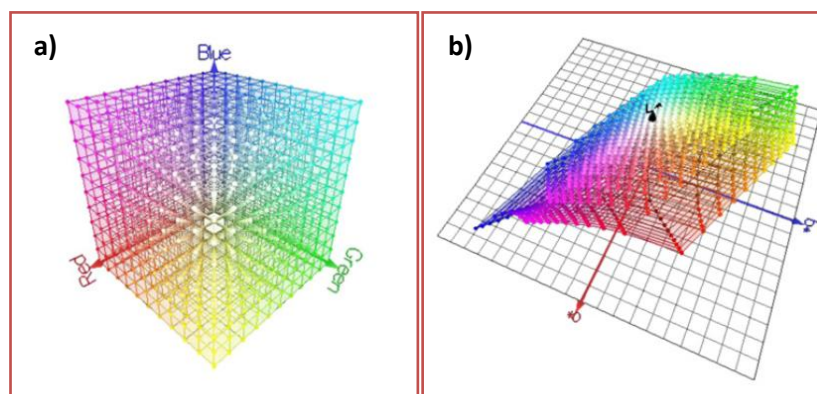
Para poder comparar los valores del color captados con el colorímetro, en el espacio de color CIE  $L^*a^*b^*$ , con los obtenidos con el SVC, en el espacio de color RGB, es necesario realizar previamente una transformación del espacio de color. En el capítulo siguiente se detallan los pasos a seguidos para realizar dicha conversión.

### 2.5.1.1 Transformación del espacio de color

Partiendo de la base de que cualquier color puede ser descrito por tres componentes, los espacios de color no dejan de ser representaciones matemáticas en un sistema de coordenadas usadas para asociar estos tres componentes con cualquier color (Wu y Sun, 2013). Existen diversos espacios de color, a continuación se explican con más detalle los dos utilizados en el presente trabajo, el RGB y el CIE  $L^*a^*b^*$ .

El espacio de color RGB, el más usado en las cámaras digitales (León *et al.*, 2006), indica la intensidad de la luz en el espectro del rojo (R), el verde (G) y el azul (B). Cada píxel de la imagen tomada tiene un valor entre 0 a 255 para cada componente, la R, la G y la B. La representación gráfica del espacio de color RGB se encuentra en la **Figura 12a**.

El espacio de color CIE  $L^*a^*b^*$  es un estándar internacional adoptado por la CIE. Este consta de la componente  $L^*$ , la cual representa la luminancia o luminosidad y oscila entre 0 (negro) y 100 (blanco), y dos componentes cromáticas: la  $a^*$ , que comprende valores entre -120 (verde) y 120 (rojo), y la  $b^*$ , entre -120 (azul) y 120 (amarillo). En la **Figura 12b** se ilustra el espacio de color CIE  $L^*a^*b^*$ .



**Figura 12.** Representación en 3D de los espacios de color (a) RGB y (b) CIE  $L^*a^*b^*$  (Wu y Sun, 2013).

Como se ha mencionado anteriormente, para comparar los valores del color medidos con el colorímetro, en el espacio de color CIE  $L^*a^*b^*$ , con los de la cámara digital, en el espacio de color RGB, es preciso realizar una transformación del espacio de color.

La transformación se ha realizado desde el espacio de color RGB al CIE  $L^*a^*b^*$  porque el espacio RGB no es absoluto (León *et al.*, 2006) sino que depende de cada dispositivo, es decir, cada cámara tiene su o sus propios sensores de color y cada uno presenta diferentes sensibilidades, dando como resultado, diferentes valores RGB para la misma escena (Girolami *et al.*, 2013). Sin embargo, el espacio CIE  $L^*a^*b^*$  es independiente del dispositivo, permite cuantificar el color de forma objetiva (Xu *et al.*, 2016) y cubre una gama más amplia de colores (Yam y Papadakis, 2004). Además, como se ha citado previamente, es el espacio de color más usado para describir el color de los alimentos.

El primer paso para la transformación del espacio de color RGB a CIE L\*a\*b\* es, a partir de los valores R, G y B no lineales captados por la cámara, obtener los valores normalizados: nR, nG y nB (**Ec. 1-3**). Y, a continuación, calcular los valores RGB estándares (sRGB): sR, sG y sB (**Ec. 4-6**) (Xu *et al.*, 2016):

$$nR = R/255 \quad (1)$$

$$nG = G/255 \quad (2)$$

$$nB = B/255 \quad (3)$$

$$sR = \begin{cases} nR/12,92 & nR \leq 0,04045 \\ ((nR + 0,055)/1,055)^{2,4} & nR > 0,04045 \end{cases} \quad (4)$$

$$sG = \begin{cases} nG/12,92 & nG \leq 0,04045 \\ ((nG + 0,055)/1,055)^{2,4} & nG > 0,04045 \end{cases} \quad (5)$$

$$sB = \begin{cases} nB/12,92 & nB \leq 0,04045 \\ ((nB + 0,055)/1,055)^{2,4} & nB > 0,04045 \end{cases} \quad (6)$$

Posteriormente, los valores sRGB son convertidos al espacio de color CIE XYZ. Para ello se utiliza una matriz de corrección para el iluminante D65 (**Ec. 7**) (Xu *et al.*, 2016).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9505 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} sR \\ sG \\ sB \end{bmatrix} \quad (7)$$

Finalmente, una vez obtenido el espacio de color CIE XYZ este puede ser transformado al espacio CIE L\*a\*b\* (**Ec. 8-11**) (Kang *et al.*, 2008).

$$L^* = 116 f(Y/Y_n) - 16 \quad (8)$$

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \quad (9)$$

$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \quad (10)$$

$$f(q) = \begin{cases} q^{1/3} & \text{si } q > 0,008856 \\ 7,787q + 16/116 & \text{si } q \leq 0,008856 \end{cases} \quad (11)$$

Donde  $q$  representa a  $X/X_n$ ,  $Y/Y_n$  y  $Z/Z_n$  respectivamente.  $X_n$ ,  $Y_n$  y  $Z_n$  son los valores del blanco de referencia. En el presente estudio,  $X_n = 0,95$ ,  $Y_n = 1,00$  y  $Z_n = 1,09$ , siendo estos valores recomendados por la CIE para el iluminante D65 (Xu *et al.*, 2016).

### 2.5.1.2 Cálculo de la exactitud del sistema

Una vez realizada la transformación del espacio de color RGB a CIE  $L^*a^*b^*$  es posible calcular la diferencia entre los valores obtenidos con el SVC y los medidos con el colorímetro. Para ello se ha calculado el error medio normalizado de cada coordenada del color ( $e_L', e_a', e_b'$ ) (**Ec. 12-14**) (León *et al.*, 2006; Tarlak *et al.*, 2016). Finalmente, se ha evaluado el error medio normalizado de las tres componentes del color conjuntamente ( $\bar{e}'$ ), o lo que es lo mismo, la exactitud del SVC (Xu *et al.*, 2016) con respecto al colorímetro (**Ec. 15**).

$$e_L' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|L_i^* - L_{SVCi}^*|}{\Delta L} \quad (12)$$

$$e_a' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|a_i^* - a_{SVCi}^*|}{\Delta a} \quad (13)$$

$$e_b' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|b_i^* - b_{SVCi}^*|}{\Delta b} \quad (14)$$

$$\bar{e}' = \frac{e_L' + e_a' + e_b'}{3} \quad (15)$$

Donde N se corresponde con el número de muestras de color. En el presente trabajo  $N = 44$ . Y  $\Delta L = 100$  y  $\Delta a = \Delta b = 240$  se refieren al rango de la componente  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , respectivamente.

### 2.5.2 Calibración

Una vez comparados los valores obtenidos con el SVC y el colorímetro, se ha considerado que estos diferían considerablemente y, con el fin de reducir esta diferencia, se ha realizado la calibración de las lecturas del SVC.

Para realizar dicha calibración se ha analizado el color de las muestras de la 'fracción 2' con el SVC y el colorímetro. Posteriormente, se ha determinado la correspondencia entre los valores medidos con el SVC y el colorímetro usando un análisis de regresión simple, empleando el método de los mínimos cuadrados ordinarios (**Ec. 16**). En total se ha construido tres rectas de calibración, una para cada coordenada del color:  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ .

$$y_i = b_0 + b_1 * x_i + \varepsilon_i \quad (16)$$

Donde:

$y_i$ : variable independiente, lectura del SVC ( $L_{SVC}^*$ ,  $a_{SVC}^*$  o  $b_{SVC}^*$ ).

$b_0$ : ordenada en origen.

$b_1$ : pendiente de la recta.

$x_i$ : variable independiente, lectura del colorímetro ( $L^*$ ,  $a^*$  o  $b^*$ ).

$\varepsilon_i$ : error de ajuste.

Una vez obtenido el modelo de regresión lineal se ha comprobado la bondad de su ajuste, es decir, si describe adecuadamente la relación entre la variable independiente y la dependiente. Una medida de esta bondad es el coeficiente de correlación ( $\rho$ ) o el cuadrado de este, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

### 2.5.3 Verificación

Para la verificación del SVC han sido utilizadas las mismas lecturas del color efectuadas con el SVC y el colorímetro en las muestras de la 'fracción 1'.

Posteriormente, las medidas realizadas con el SVC han sido usadas para, a partir de las rectas de calibración construidas, estimar las coordenadas del color de cada muestra.

Finalmente, las coordenadas del color estimadas han sido comparadas nuevamente con las obtenidas con el colorímetro. Para la cuantificación de la diferencia entre los valores estimados y los medidos con el colorímetro se han utilizado las mismas fórmulas que para el cálculo del error medio normalizado de la caracterización (**Ec. 12-15**), con la excepción de que las componentes  $L_{SVC}^*$ ,  $a_{SVC}^*$  y  $b_{SVC}^*$  han sido sustituidas por  $\hat{L}^*$ ,  $\hat{a}^*$  y  $\hat{b}^*$ .

Una vez realizado todo el proceso de validación, a través del error medio normalizado conjunto, puede determinarse si este es suficientemente bajo (para una aplicación en concreto) como para utilizar las rectas de calibración construidas para estimar los valores  $\hat{L}^*$ ,  $\hat{a}^*$  y  $\hat{b}^*$  y poder prescindir así del colorímetro.

## 2.6 MATERIAL VEGETAL

Para la demostración de la viabilidad del SVC para la medida del color de un tomate real se ha utilizado un fruto de la variedad Penjar (*Solanum lycopersicum* L. cv. Punxa), cosechado al estadio de madurez completa.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 SISTEMA DE CAPTACIÓN DE IMÁGENES

El sistema de captación de imágenes construido cumple con su cometido de iluminar la muestra, controlar la entrada de luz ambiente y sustentar todos los elementos. Sin embargo, al tratarse del primer prototipo diseñado, es conveniente realizar ciertos cambios con el fin de perfeccionarlo. En el **Apartado 3.4** se presentan algunas propuestas de mejora del sistema de captación de imágenes.

#### 3.2 PROGRAMA E INTERFAZ GRÁFICA

El segundo y tercer resultado alcanzados se presentan conjuntamente, estos son: el programa desarrollado para la adquisición, procesado, análisis y almacenado de imágenes, y la interfaz gráfica de usuario. Se ha considerado que la mejor manera de expresar estos resultados era mostrando el funcionamiento del SVC mediante el estudio de un tomate real. Los resultados obtenidos más relevantes se presentan a continuación.

Por otro lado, hacer hincapié en que todo el programa se ha desarrollado para un usuario en concreto, pudiéndose adaptar a las necesidades de cualquier otro, ya que las posibilidades del software usado son casi ilimitadas.

##### 3.2.1 Calibración espacial

Siendo la finalidad de este apartado obtener la equivalencia entre píxeles y centímetros, el resultado de la media de las tres repeticiones efectuadas es de 39 píxeles/cm. Esta correspondencia se utiliza, además, como valor por defecto en caso de que el usuario omita la calibración espacial. Cabe mencionar que, si se modifica la altura de la cámara o del techo del sistema de iluminación, este valor por defecto debe ser reconsiderado.

##### 3.2.2 Medida del color automática

A partir del análisis del fruto de tomate con esta sección del programa se han obtenido los resultados recogidos en la **Tabla 5**.

**Tabla 5.** Resultados de la medida del color automática realizada con el SVC.

Ángulo	Coordenada			$L_{SVC}^*$	$a_{SVC}^*$	$b_{SVC}^*$
	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>			
0°	221	112	86	59,56	34,23	31,15
45°	236	173	143	75,89	12,34	20,63
90°	244	207	137	84,83	-3,40	35,68
135°	240	221	136	87,98	-12,33	40,09
180°	239	218	118	86,90	-12,78	47,76
225°	246	225	140	89,55	-11,72	40,13
270°	237	169	82	74,18	9,81	50,70
315°	210	145	96	65,59	13,05	32,69
<b>Media</b>	234,13	183,75	117,25	78,06	3,65	37,35
<b>Desviación estándar</b>	12,32	41,03	25,62	11,16	16,68	9,59

En la **Tabla 5** se muestran las coordenadas del color en el espacio de color RGB y su correspondiente transformación a CIE  $L^*a^*b^*$ , de los 8 cuadrados construidos en base al centro y radio del tomate. En este ejemplo, han sido eliminados los valores del noveno cuadrado, el central, ya que se corresponden con el pedúnculo del tomate. Además, como estos valores son poco intuitivos por sí solos, se han añadido dos filas a la tabla con la media y la desviación estándar de cada coordenada del color. A partir de la media puede obtenerse el color promedio de la muestra y, a través de la desviación estándar, es posible analizar la heterogeneidad del color del fruto. En el presente trabajo no se ha efectuado dicho análisis, sin embargo, da pie a estudios futuros.

Este apartado del programa ha sido diseñado con el fin de permitir analizar varias muestras de tomate seguidas. El usuario que realiza la medida del color solo debe colocar el fruto dentro del SVC, cubrirlo con la ropa negra, y presionar el botón del programa 'Nueva muestra', pudiendo repetir este proceso cuantas veces quiera.

La sencillez de la toma de medidas del SVC permite ahorrar tiempo frente a otras técnicas de medida del color tradicionales. Por ejemplo, el colorímetro, el cual solo permite captar el color de una pequeña superficie (unos 5 cm<sup>2</sup> para el modelo CR-400 (Konica Minolta, 2013)), requiriendo de un tiempo considerable para el análisis de toda la superficie del tomate. Adicionalmente, es necesario un tiempo de espera entre medidas. En la **Tabla 6** se realiza la comparación entre el tiempo total de análisis del color de un tomate (basado en 9 mediciones) realizado con el SVC y el colorímetro Konica Minolta CR-400.

**Tabla 6.** Comparativa del tiempo de análisis del color de una muestra, realizado a partir de 9 medidas, entre el SVC y el colorímetro Konica Minolta CR-400.

	SVC	Colorímetro
Tiempo de medición (s)	3*	1
Intervalo mínimo de medición (s)	-	3
Número de medidas simultáneas	9	1
Tiempo total análisis muestra (s)	3	36

\*tiempo estimado experimentalmente.

A partir de los resultados mostrados en la **Tabla 6**, puede concluirse que el SVC construido es capaz de analizar el color de la superficie del tomate (basado en 9 medidas), aproximadamente, doce veces más rápido que el colorímetro Konica Minolta CR-400.

Por otro lado, la principal limitación que presenta este apartado es la incapacidad de analizar tomates con formas irregulares, detectando solo figuras circulares. Ello es debido a la instrucción utilizada durante la programación: *find circular edge* (encontrar bordes circulares). Otro efecto colateral de la utilización de dicha función, es que solo es posible analizar una muestra de tomate cada vez. Con el fin de mitigar estos inconvenientes, se ha diseñado la sección 'medida del color manual' (**Apartado 2.4.3**), que no presenta limitación alguna con respecto a la forma de la muestra ni en lo relativo al número de muestras que pueden ser analizadas simultáneamente, pero su utilización implica una mayor demanda de tiempo.



### 3.2.3 Obtención de dimensiones

La función de este apartado del programa es la de obtener el área, el perímetro y la anchura y altura máximas de la muestra. Siento estas características físicas de gran relevancia para el estudio de la morfología del tomate. Prueba de ello es que estas mismas son utilizadas en la publicación de Cheng-Jin y Da-Wen (2004) para el estudio de, por ejemplo, la circularidad, compactibilidad y excentricidad de los alimentos.

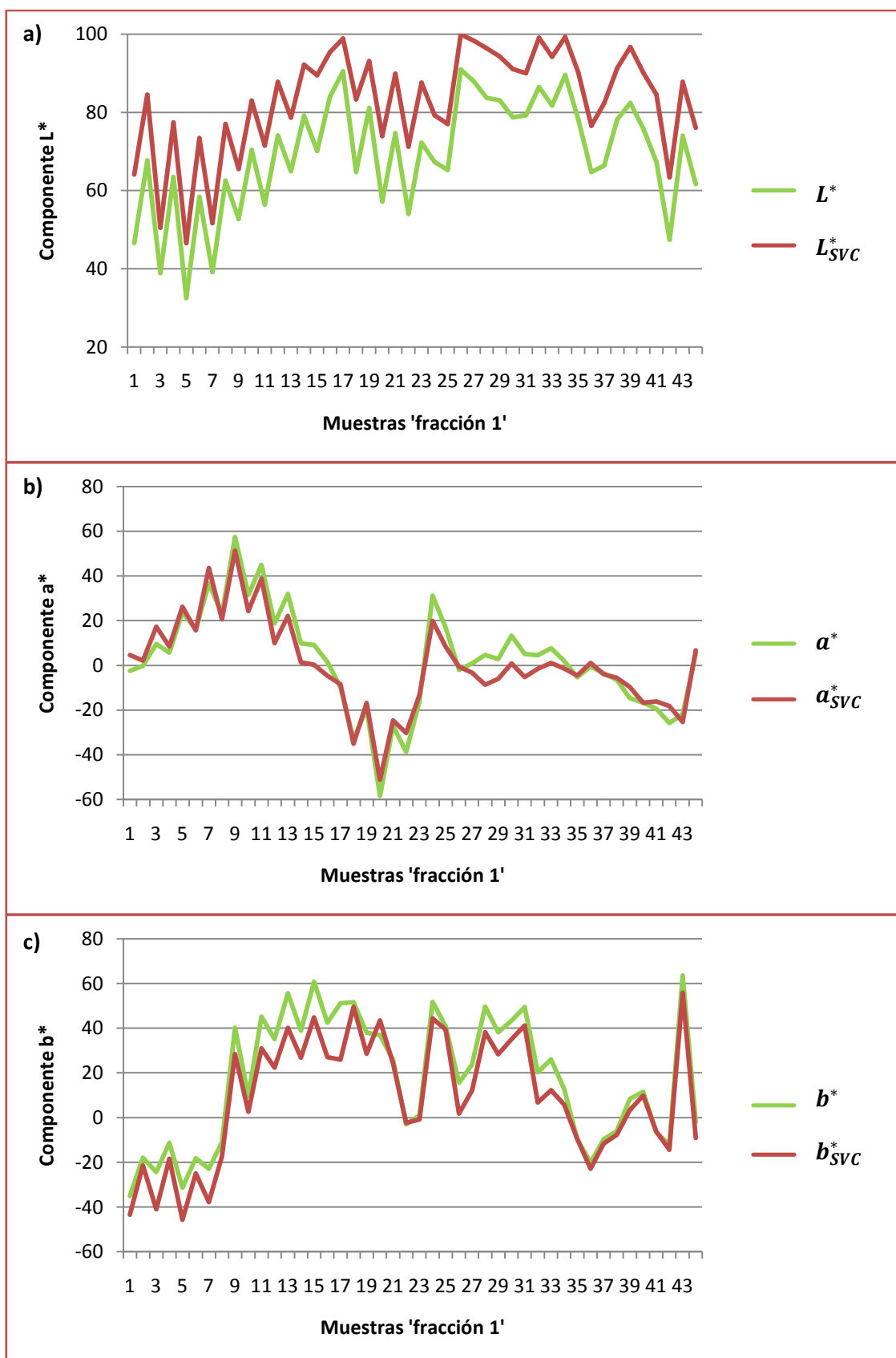
Por otro lado, mencionar que esta sección del programa, a diferencia del apartado 'medida automática del color', puede obtener medidas de tomates con formas irregulares, aunque es incapaz de analizar más de una muestra a la vez.

## 3.3 VALIDACIÓN DEL DISEÑO

Una vez construido el sistema de captación de imágenes y desarrollado el programa, se ha validado el diseño. Para ello primero ha sido caracterizado comparando las medidas efectuadas con el SVC y el colorímetro (**Apartado 3.3.1**). Como se ha considerado inaceptable la diferencia entre los valores medidos con ambos instrumentos ( $\bar{e}' = 6,42\%$ ), se ha calibrado el SVC (**Apartado 3.3.2**). Posteriormente, se han estimado, con las rectas de calibración, los valores del color obtenidos a partir de las medidas del SVC y se han comparado con las lecturas del colorímetro (**Apartado 3.3.3**).

### 3.3.1 Caracterización

Una vez realizada la transformación del espacio de color RGB a CIE L\*a\*b\*, se han podido comparar los valores obtenidos con el SVC y el colorímetro. Una manera de evidenciar la disparidad entre estos valores es mediante la representación gráfica. En la **Figura 13** se muestran dichas representaciones, una para cada coordenada del color. Por otra parte, la cuantificación de estas diferencias, mediante el cálculo del error medio normalizado conjunto ( $\bar{e}'$ ) y el de cada componente individualmente ( $e_{L'}$ ,  $e_{a'}$ ,  $e_{b'}$ ), se encuentra en la **Tabla 7**.



**Figura 13.** Representación de la diferencia entre los valores medidos con el SVC ( $L_{SVC}^*$ ,  $a_{SVC}^*$ ,  $b_{SVC}^*$ ) y con el colorímetro ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) de las muestras de la 'fracción 1'. **a)** Componente  $L^*$ , **b)** Componente  $a^*$  y **c)** Componente  $b^*$ .

En la **Figura 13a** queda de manifiesto como los valores captados con el SVC están, claramente, por encima de los medidos con el colorímetro. Por contra, en la **Figura 13c**, son los valores obtenidos con el SVC los que se hallan por debajo de los del colorímetro. En la **Figura 13b**, sin embargo, no existe una tendencia clara, algunos valores están por encima y otros por debajo.

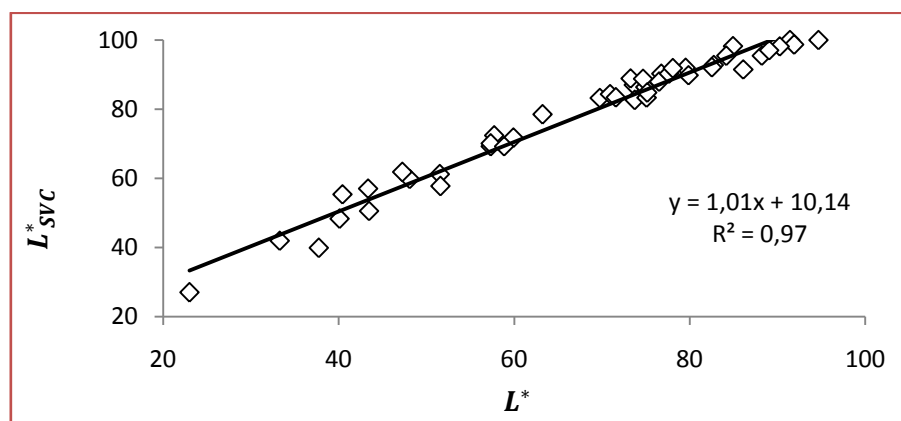
**Tabla 7.** Error medio normalizado de cada parámetro y del conjunto calculado a partir de  $L_{SVC}^*$ ,  $a_{SVC}^*$ ,  $b_{SVC}^*$  y  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ .

	(%)
$e_L'$	13,60
$e_a'$	2,19
$e_b'$	3,48
$\bar{e}'$	6,42

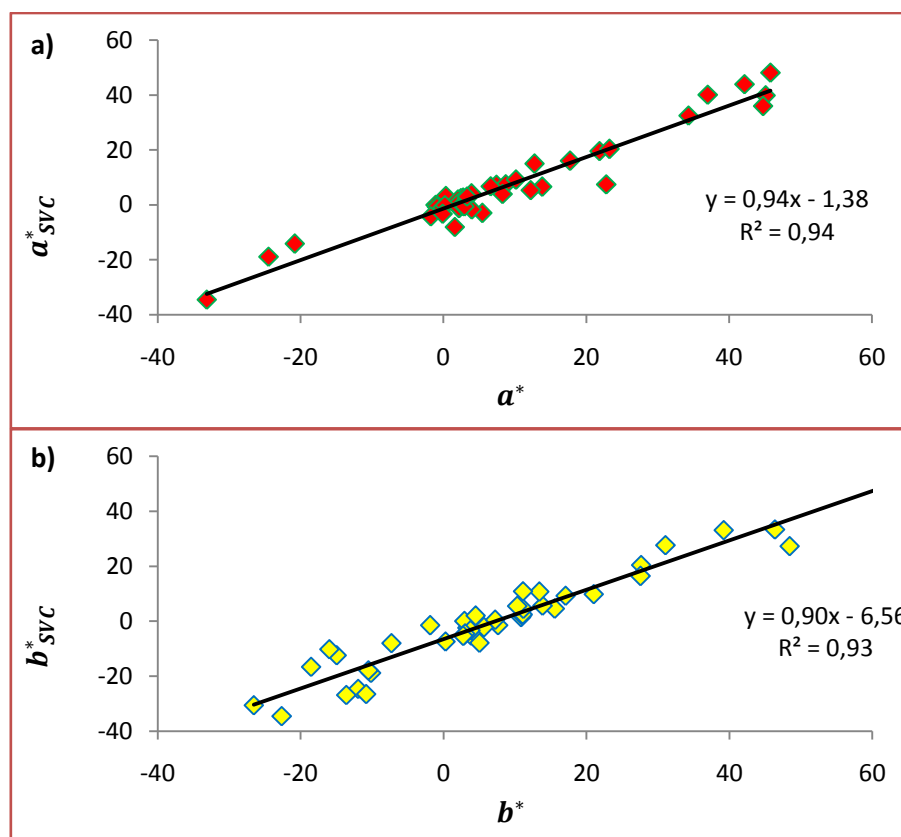
Observando la **Tabla 7** queda patente que la coordenada  $L^*$  presenta un error mayor al de las componentes cromáticas, alrededor de 4 veces superior. Este hecho provoca un incremento en el error medio conjunto de las tres coordenadas, siendo este inaceptablemente alto (6,42 %). Para solventar la disparidad entre los valores medidos con el SVC y el colorímetro, se ha realizado la calibración de las lecturas del sistema.

### 3.3.2 Calibración

Las rectas de calibración construidas para calibrar las lecturas del SVC, una para cada coordenada del color, se muestran en las **Figuras 14 y 15**, así como la correspondiente ecuación de la recta y coeficiente de determinación.



**Figura 14.** Recta de calibración de la componente  $L^*$  obtenida a partir de las medidas del SVC y el colorímetro Konica Minolta CR-400 en las muestras del color de la 'fracción 2'.



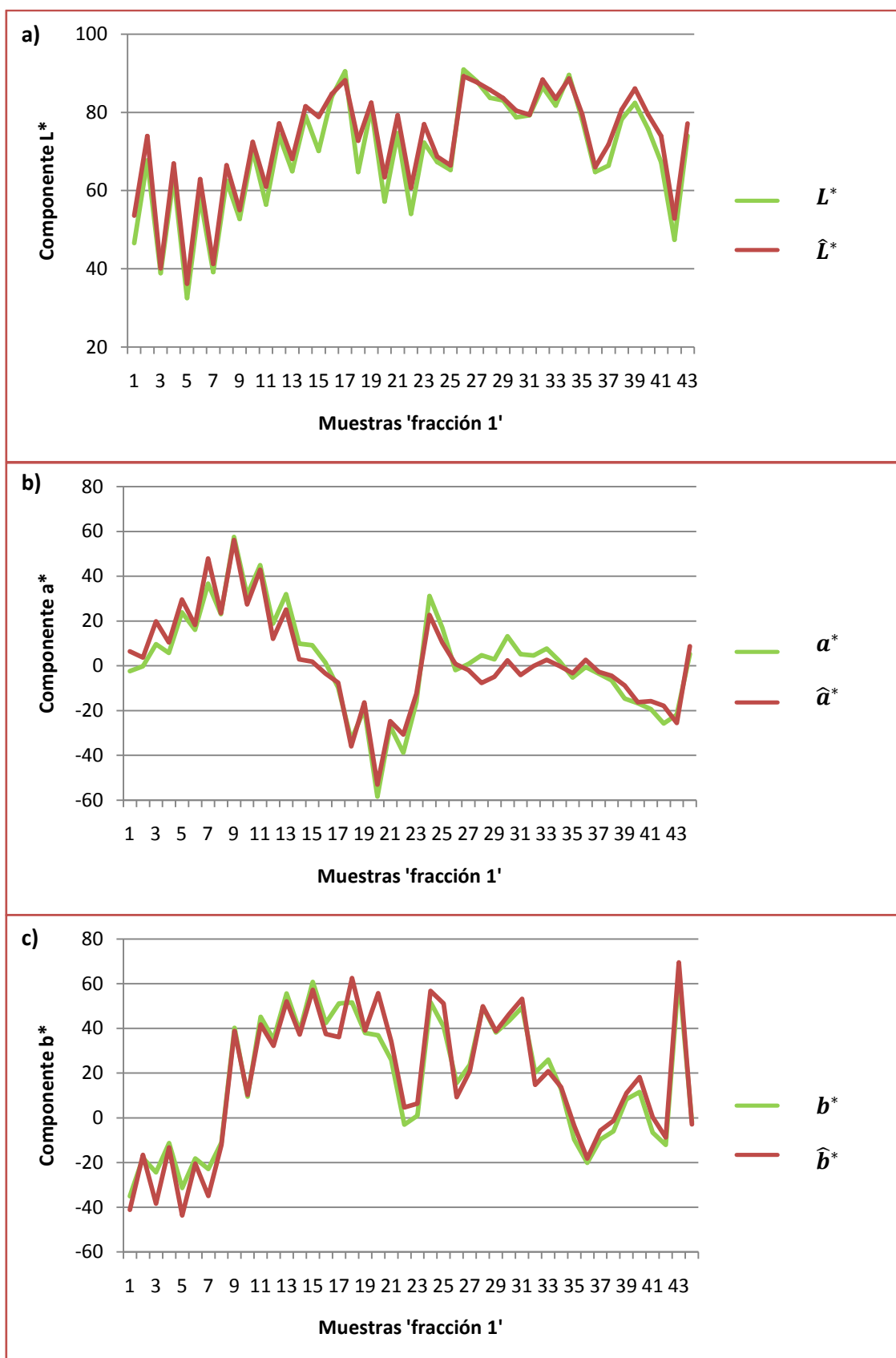
**Figura 15.** Rectas de calibración de las componentes **(a)**  $a^*$  y **(b)**  $b^*$  obtenidas a partir de las medidas del SVC y el colorímetro Konica Minolta CR-400 en las muestras del color de la ‘fracción 2’.

A la vista de los diagramas de dispersión de las **Figuras 14 y 15** puede percibirse, para todos los gráficos, que el modelo de regresión lineal escogido es apropiado para establecer la relación entre los valores medidos con el SVC y el colorímetro. También queda patente que no hay ningún valor atípico que deba ser descartado.

La bondad del ajuste de los datos con el modelo de regresión lineal queda reflejada en el coeficiente de determinación, siendo el de la coordenada del color  $b^*$  el que presenta un valor más bajo. Aun así, este se encuentra por encima de 0,90, lo que indica una alta correspondencia entre las medidas realizadas con el SVC y el colorímetro. Una posibilidad que podría barajarse para alcanzar un coeficiente de determinación mayor sería la introducción de las mejoras del sistema de captación de imágenes que se proponen más adelante (**Apartado 3.4**).

### 3.3.3 Verificación

Utilizando la recta de calibración de cada coordenada del color, a partir de los valores obtenidos con el SVC, se han estimado las coordenadas del color de las muestras de la ‘fracción 1’. Estas se encuentran representadas en la **Figura 16** junto con las medidas realizadas previamente con el colorímetro. La cuantificación del error medio normalizado conjunto y el de cada parámetro individualmente está representada en la **Tabla 8**.



**Figura 16.** Representación de la diferencia entre los valores estimados con el modelo de regresión lineal ( $\hat{L}^*$ ,  $\hat{a}^*$ ,  $\hat{b}^*$ ) y los medidos con el colorímetro ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) de las muestras de la 'fracción 1'. **a)** Componente  $L^*$ , **b)** Componente  $a^*$  y **c)** Componente  $b^*$ .

En la **Figura 16** puede observarse que todas las gráficas, además de seguir la misma tendencia, exhiben unos valores parecidos, despuntando ligeramente en algunas muestras concretas, y resultando más difícil aventurar cuál de ellas presenta una diferencia mayor entre los valores estimados con las rectas de calibración y aquellos obtenidos con el colorímetro. Comparando las representaciones gráficas de las lecturas efectuadas con el colorímetro y con el SVC antes (**Figura 13**) y después de la calibración (**Figura 16**), se aprecia claramente que las coordenadas del color más parecidas a las obtenidas con el colorímetro son las estimadas con el modelo de regresión lineal.

**Tabla 8.** Error medio normalizado de cada parámetro y del conjunto calculado a partir de  $\hat{L}^*$ ,  $\hat{a}^*$ ,  $\hat{b}^*$  y  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ .

	(%)
$e_L$	3,26
$e_a$	2,09
$e_b$	2,15
$\bar{e}$	2,50

Este hecho queda reafirmado observando los errores medios normalizados (**Tabla 8**). Aunque la componente  $L^*$  sigue siendo la que presenta una mayor diferencia con respecto al colorímetro, el error de esta ha disminuido desde el 13,60 % (**Tabla 7**), antes de realizar la calibración, hasta el 3,26 % después de esta. Las componentes cromáticas,  $a^*$  y  $b^*$ , también han experimentado una disminución en el error medio normalizado, aunque de forma más moderada. De la misma manera, el error medio normalizado conjunto también ha sufrido una bajada considerable, del 6,42 % al 2,50 %. Evidenciando la exactitud de las medidas del color estimadas con el SVC del presente trabajo.

Los valores del error medio normalizados presentados por Xu *et al.* (2016), ( $\bar{e} = 2,40$  %,  $e_L = 4,08$  %,  $e_a = 2,02$  % y  $e_b = 1,10$  %) no divergen mucho con respecto a los del presente trabajo. Realizando la comparación entre ambos estudios, puede observarse que el error medio normalizado conjunto obtenido por Xu *et al.* (2016) es un 0,10 % inferior al del SVC construido. En lo que respecta al error de cada componente, la coordenada  $L^*$  es la que presenta un error mayor en ambos estudios, mostrando un error superior la obtenida por Xu *et al.* (2016). Sin embargo, los errores de las componentes  $a^*$  y  $b$  son mayores los presentados en este trabajo.

En el **Anexo C** se encuentra recogido, a modo de ejemplo, el color de algunas de las muestras de la 'fracción 1' medidas con el colorímetro y con el SVC antes y después de la calibración.

### 3.4 PROPUESTAS DE MEJORA

Al tratarse del primer prototipo de SVC diseñado, sería conveniente realizar ciertos cambios con el fin de perfeccionarlo. A continuación, se presentan algunas propuestas de mejora, tanto del sistema de captación de imágenes como del programa desarrollado.

### 3.4.1 Sistema de captación de imágenes

Se han encontrado dos aspectos que podrían ser modificados en un futuro con el propósito de mejorar el sistema de captación de imágenes.

En primer lugar, podría considerarse añadir un difusor en cada reflector, tal y como incorporan Mendoza *et al.* (2006), Valous *et al.* (2009), Girolami *et al.* (2013) y Tarlak *et al.* (2016). El problema que se pretende solventar con esta implementación sería evitar la presencia de sombras alrededor de la muestra de tomate, así como la aparición de brillos en su superficie. La incorporación de estos difusores evitaría la incidencia directa de la luz sobre la muestra (Goñi y Salvadori 2017), reduciendo la aparición de brillos, reflexiones especulares y sombras; pero resultando muy complicada su eliminación total en muestras con superficies curvadas y ondulaciones, como las de frutas y verduras (Valous *et al.*, 2009).

Por otro lado, un aspecto relacionado con lo anteriormente citado, es el techo del sistema de captación de imágenes. Este está constituido por un tablero recubierto con una chapa embellecedora, la cual exhibe cierto brillo. Para evitar reflexiones en el interior del sistema de captación de imágenes, sería recomendable recubrir el techo con algún material mate de color negro, por ejemplo, tela (Tarlak *et al.*, 2016).

### 3.4.2 Programa

En referencia a las posibles mejoras del programa diseñado, se proponen las siguientes: adaptación para la medida del color de tomates con formas irregulares, integración de las rectas de calibración construidas para la obtención directa de los valores  $\hat{L}^*$ ,  $\hat{a}^*$ ,  $\hat{b}^*$  estimados, detección automática de defectos, incorporación de una función que permita decidir al usuario si captar, o no, el color del cuadrado central y, por último, análisis simultáneo de varias muestras.

## 3.5 COSTE ECONÓMICO DEL SISTEMA

En lo relativo al coste económico del SVC, en primer lugar se presentan los costes y, posteriormente, se proponen algunos cambios para la reducción de los mismos.

Los precios de todos los elementos utilizados en la construcción del prototipo del SVC se detallan en la **Tabla 9**. Es de mencionar que no han sido incluidas las horas de dedicación de la autora de este trabajo para el diseño y desarrollo del programa ni del montaje del sistema de captación de imágenes. Tampoco los objetos que han sido reutilizados o no han tenido coste, marcados en la tabla con un guión. En lo que respecta a la licencia del programa LabVIEW, se ha utilizado una licencia de estudiante, sin coste alguno.

El hecho de especificar el coste no es una práctica habitual en la bibliografía encontrada. Después de revisar múltiples artículos (Yam y Papadakis, 2004; Briones y Aguilera, 2005; Mendoza *et al.*, 2006; Pedreschi *et al.*, 2006; Valous *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2016) en ninguno de ellos se ha encontrado una mención al coste de los SVC que han desarrollado. Este hecho es sorprendente, dado que se suele citar el coste como una de las principales ventajas de los SVC sobre los otros métodos tradicionales de medida del color.



**Tabla 9.** Precio de los componentes usados para la construcción del prototipo del SVC.

Componente	Cantidad	Coste (€)/ud.	Coste (€) total
Arandela (∅ 10 mm)	12	0,13	1,56
Arandela (∅ 8 mm)	2	0,13	0,26
Tubo LED Philips MAS LEDtube 600 mm 9W 865 T8 RS	2	18,23*	36,46*
Cámara web Trust Trino	1	24,28	24,28
Cartulina blanca DIN A2	1	0,50	0,50
Escuadra de refuerzo plana	2	0,35	0,70
Regleta de aluminio con reflector 600 mm	2	11,72*	23,44*
Regleta de conexiones	6	0,17	1,02
Ordenador portátil Asus T100TAM	1	239,00	239,00
Tornillo autorroscante (35 mm de longitud)	4	0,12	0,48
Tornillo de cabeza hexagonal (∅ 8 mm)	2	0,14	0,28
Tuerca (∅ 10 mm)	8	0,22	1,76
Tuerca (∅ 8 mm)	2	0,12	0,24
Tuerca mariposa (∅ 10 mm)	4	0,69	2,76
Tuerca mariposa (∅ 8 mm)	2	0,47	0,94
Varilla roscada 1 m (∅ 10 mm)	2	0,93	1,86
Varilla roscada 0,5 m (∅ 8 mm)	1	0,33	0,33
Cable de fuente de alimentación	1	-	-
Licencia de LabVIEW	1	-	-
Madera aglomerada 55x55 cm	2	-	-
Ropa negra	1	-	-
Taco de madera en ángulo de 45°	4	-	-
		<b>Coste total</b>	<b>335,87</b>

\*Incluye el precio del transporte.

El coste total del SVC del presente trabajo es de 335,87 € (**Tabla 9**). Este importe representa un 4,48 % del precio de un sistema de medida del color profesional de referencia, concretamente el del colorímetro Konica Minolta CR-400, el cual es de 7500 €.

Sin embargo, el coste total del SVC podría verse aún más reducido. A continuación, se evalúa la sustitución de dos componentes del sistema con ese fin.

El primer elemento que podría ser remplazado, y cuyo precio es el más elevado (239 €), se corresponde con el ordenador portátil Asus T100TAM. Este representa, aproximadamente, un 70% del coste total del SVC. Sin embargo, su uso estuvo motivado por su disponibilidad. Se podría haber empleado otro con prestaciones inferiores y, por tanto, menor precio, o haber sido sustituido por un ordenador compacto.

En el mercado existen diversos ordenadores compactos con precios asequibles, uno de ellos es LattePanda, disponible por unos 100 €. Este tiene las prestaciones necesarias para cumplir con los requerimientos del programa LabVIEW y el módulo *Vision Development Module* (**Tabla 10**) y, por tanto, sería capaz de remplazar al ordenador portátil utilizado. El coste de una pantalla LCD compatible con LattePanda es de unos 16 €. Así pues, la posible sustitución del ordenador portátil por el ordenador compacto LattePanda reduciría en más de un 50 % el gasto realizado en el ordenador, dejando el coste total del SVC en 212,37 €.



**Tabla 10.** Comparativa entre las características del ordenador portátil Asus T100TAM, el ordenador compacto LattePanda y los requerimientos mínimos del programa LabVIEW con el módulo *Vision Development Module* (VDM).

Característica	Dispositivo		Requisitos mínimos
	Asus T100TAM	LattePanda	LabVIEW y VDM
<b>Procesador</b>	Intel Atom Z3775	Intel Atom x5-Z8350	Pentium 4M o 4G1 (o equivalente) o posterior
<b>Memoria RAM (GB)</b>	2	2	1
<b>Disco duro (GB)</b>	32	32	8,2 (5 GB LabVIEW + 3,2 GB VDM)
<b>Sistema operativo</b>	Windows 8.1	Windows 10	Windows 10/8.1/8/7

Otro componente que podría ser sustituido para abaratar el sistema de captación de imágenes son los tubos LED. En el mercado pueden encontrarse tubos LED con características similares a los usados en este trabajo que rebajarían el coste unitario de 18,23 € a unos 11 €. Sin embargo, como se ha citado anteriormente, la elección de un tubo LED de una marca conocida, Philips, se realizó con la intención de facilitar la reproductibilidad del trabajo, a sabiendas de que supondría un incremento en el coste de, aproximadamente, un 65 %.

## CONCLUSIONES

Se ha diseñado un sistema de captación de imágenes de bajo coste y se ha probado su adecuado funcionamiento.

Se ha demostrado, mediante el análisis de un fruto de tomate, el funcionamiento del programa para la adquisición, procesado, análisis y almacenado de imágenes. Entre las funciones más relevantes del programa desarrollado, se encuentra la medida del color automática, tanto en el espacio de color RGB como CIE  $L^*a^*b^*$ . Esta cuantificación automática permite obtener, simultáneamente, el color de varias áreas del tomate, permitiendo reducir considerablemente el tiempo de análisis de cada muestra, en comparación con un colorímetro comercial. El programa diseñado incorpora, además, otras funcionalidades, como la elección manual de la zona de la imagen donde se quiere medir el color, capturar imágenes y adquirir algunas características físicas del fruto tales como el área, perímetro, anchura y altura máximas.

Por otro lado, se ha mostrado que la interfaz gráfica diseñada permite una fácil manipulación del programa por parte del usuario.

A partir de la comparación de las lecturas efectuadas con el SVC y un colorímetro comercial, se ha construido una recta de calibración para cada componente del color. Estas permiten estimar las coordenadas del color en el espacio CIE  $L^*a^*b^*$  a través de las medidas realizadas con el SVC sin necesidad de disponer de un colorímetro. El análisis de la bondad del ajuste del modelo de regresión lineal se ha realizado a partir del análisis del coeficiente de determinación, los cuales presentan un alto valor  $R^2 = 0,97$ ,  $R^2 = 0,94$  y  $R^2 = 0,93$  para las componentes  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , respectivamente. El cálculo del error medio normalizado conjunto (2,50 %) ha permitido determinar la exactitud de las medidas del color estimadas.

El primer prototipo de SVC desarrollado requiere de ciertas modificaciones, tanto en el sistema de captación de imágenes como en el programa, con el fin de solventar errores y perfeccionar el sistema. Algunas propuestas de mejora están recogidas en el trabajo.

Así mismo, el programa desarrollado ha sido diseñado siguiendo las especificaciones requeridas por el laboratorio de mejora genética del tomate de la Fundació Miquel Agustí (Universitat Politècnica de Catalunya), pudiendo ser modificado para adaptarlo a las necesidades de cualquier otro usuario.

**BIBLIOGRAFÍA**

- ABDULLAH, M.Z., 2016. Image Acquisition Systems. A: S. DA-WEN (ed.), *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation*. Segunda Ed. Penang (Malasia): Elsevier, pp. 3-43. ISBN 978-0128022320.
- BALABAN, M.O. y ODABASI, A.Z., 2006. Measuring color with machine vision. *Journal of Food Technology*, vol. 60, no. 12, pp. 32-36. ISSN 1684-8462.
- BREWER, M.T., LANG, L., FUJIMURA, K., DUJMOVIC, N., GRAY, S. y VAN DER KNAAP, E., 2006. Development of a controlled vocabulary and software application to analyze fruit shape variation in tomato and other plant species. *Plant physiology*, vol. 141, no. 1, pp. 15-25. ISSN 1532-2548. DOI 10.1104/pp.106.077867.
- BRIONES, V. y AGUILERA, J.M., 2005. Image analysis of changes in surface color of chocolate. *Food Research International*, vol. 38, no. 1, pp. 87-94. ISSN 0963-9969. DOI 10.1016/j.foodres.2004.09.002.
- CHENG-JIN, D. y DA-WEN, S., 2004. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends in Food Science and Technology*, vol. 15, no. 5, pp. 230-249. ISSN 0924-2244. DOI 10.1016/j.tifs.2003.10.006.
- CIE, 2017. *International Commission on Illumination*. [en línea]. Viena (Austria): Commission Internationale de L'Éclairage. [Consulta: 18 abril 2017]. Disponible en: <http://www.cie.co.at/>.
- COSTA, C., ANTONUCCI, F., AGUZZI, J., SUN, D.-W. y MENESATTI, P., 2011. Shape analysis of agricultural products: a review of recent research advances and potential application to computer vision. *Food and Bioprocess Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 673-692. ISSN 1935-5149. DOI 10.1007/s11947-011-0556-0.
- CUBERO, S., ALEIXOS, N., MOLTÓ, E., GÓMEZ-SANCHIS, J. y BLASCO, J., 2011. Advances in Machine Vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables. *Food and Bioprocess Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 487-504. ISSN 1935-5130. DOI 10.1007/s11947-010-0411-8.
- DARRIGUES, A., HALL, J., KNAAP, E. Van Der, FRANCIS, D.M., DUJMOVIC, N. y GRAY, S., 2008. Tomato Analyzer-color test: a new tool for efficient digital phenotyping. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 133, no. 4, pp. 579-586. ISSN 2327-9788.
- DE OLIVEIRA, E.M., LEME, D.S., BARBOSA, B.H.G., RODARTE, M.P. y ALVARENGA PEREIRA, R.G.F., 2016. A computer vision system for coffee beans classification based on computational intelligence techniques. *Journal of Food Engineering*, vol. 171, pp. 22-27. ISSN 0260-8774. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2015.10.009.
- FAO, 2017. *FAOSTAT*. [en línea]. Roma (Italia): Food and Agriculture Organization [Consulta: 15 abril 2017]. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/>.
- GIROLAMI, A., NAPOLITANO, F., FARAONE, D. y BRAGHIERI, A., 2013. Measurement of meat color using a computer vision system. *Meat Science*, vol. 93, no. 1, pp. 111-118. ISSN 0309-1740. DOI 10.1016/j.meatsci.2012.08.010.
- GOÑI, S.M. y SALVADORI, V.O., 2017. Color measurement: comparison of colorimeter vs. computer vision system. *Journal of Food Measurement and Characterization*, vol. 11, no. 2, pp. 538-547. ISSN 2193-4134. DOI 10.1007/s11694-016-9421-1.



- GÜMÜS, B., BALABAN, M.O. y UNLUSAYIN, M., 2011. Machine Vision applications to aquatic foods: a review. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 11, no. 1, pp. 171-181. ISSN 1303-2712. DOI 10.4194/trjfas.2011.0124.
- HEUVELINK, E., 2005. *Tomatoes*. Primera ed. Trowbridge (Inglaterra): CABI. Crop production science in horticulture, no. 13. ISBN 0-85199-396-6.
- KANG, S.P., EAST, A.R. y TRUJILLO, F.J., 2008. Colour vision system evaluation of bicolour fruit: a case study with 'B74' mango. *Postharvest Biology and Technology*, vol. 49, no. 1, pp. 77-85. ISSN 0925-5214. DOI 10.1016/j.postharvbio.2007.12.011.
- KAYS, S.J., 1991. *Postharvest physiology of perishable plant products*. Primera Ed. Nueva York (Estados Unidos): Springer. ISBN 9780442239121.
- KONICA MINOLTA, 2013. *Chroma meter CR-400/410: manual de instrucciones* [en línea]. Tokio (Japón): Konica Minolta, 2013. Disponible en: [http://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction\\_manual/color/pdf/cr-400-410\\_instruction\\_spa.pdf](http://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/color/pdf/cr-400-410_instruction_spa.pdf).
- KRAMES, M.R., SHCHEKIN, O.B., MUELLER-MACH, R., MUELLER, G.O., ZHOU, L., HARBERS, G. y CRAFT, M.G., 2007. Status and future of high-power Light-Emitting Diodes for solid-state lighting. *Journal of Display Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 160-175. ISSN 1558-9323. DOI 10.1109/JDT.2007.895339.
- LEÓN, K., DOMINGO, M., PEDRESCHI, F. y LEÓN, J., 2006. Color measurement in L \* a \* b \* units from RGB digital images. *Food Research International*, vol. 39, no. 10, pp. 1084-1091. ISSN 0963-9969. DOI 10.1016/j.foodres.2006.03.006.
- LU, J., TAN, J., SHATADAL, P. y GERRARD, D., 2000. Evaluation of pork color by using computer vision. *Meat Science*, vol. 56, no. 1, pp. 57-60. ISSN 0309-1740. DOI 10.1016/S0309-1740(00)00020-6.
- MCCAIG, T.N., 2002. Extending the use of visible/near-infrared reflectance spectrophotometers to measure colour of food and agricultural products. *Food Research International*, vol. 35, no. 8, pp. 731-736. ISSN 0963-9969. DOI 10.1016/S0963-9969(02)00068-6.
- MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A.J., VICARIO, I.M. y HEREDIA, F.J., 2005. Instrumental measurement of orange juice colour: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 85, no. 6, pp. 894-901. ISSN 1097-0010. DOI 10.1002/jsfa.2115.
- MENDOZA, F., DEJMEK, P. y AGUILERA, J.M., 2006. Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. *Postharvest Biology and Technology*, vol. 41, no. 3, pp. 285-295. ISSN 0925- 5214. DOI 10.1016/j.postharvbio.2006.04.004.
- NI, 2011. *Grayscale Morphology*. [en línea]. Austin (Estados Unidos): National Instruments. [Consulta: 1 junio 2017]. Disponible en: [http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372916L-01/nivisionconcepts/grayscale\\_morphology/#closing](http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372916L-01/nivisionconcepts/grayscale_morphology/#closing).
- NI, 2015. *LabVIEW 15.0*. [en línea]. Austin (Estados Unidos): National Instruments. [Consulta: 3 enero 2017]. Disponible en: <http://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>.

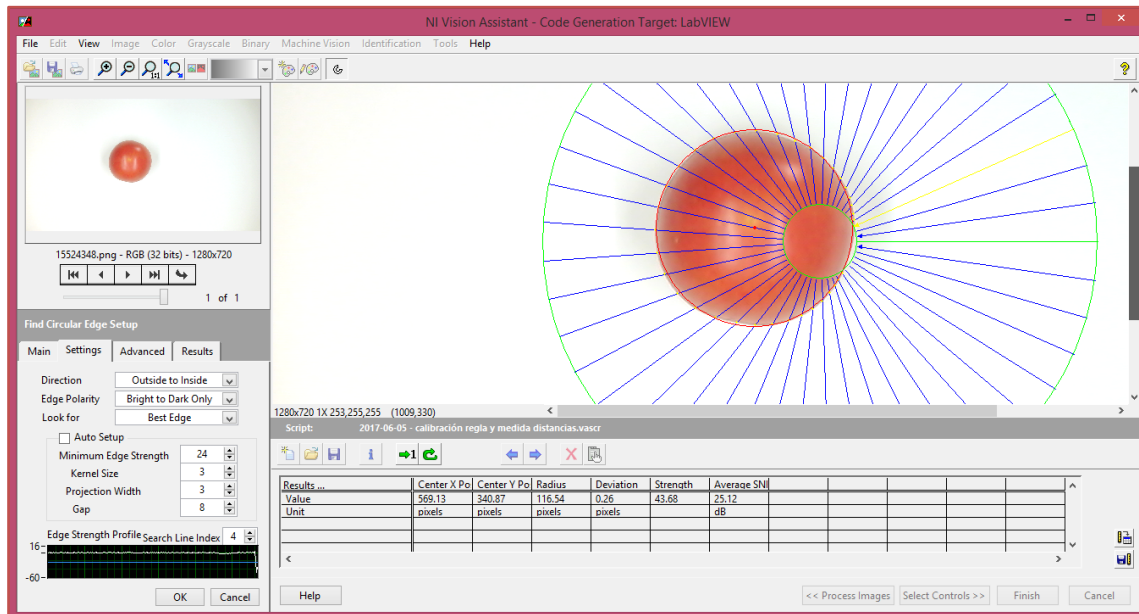
- PADRÓN, C.A., PADRÓN, G.M., MONTES, A.I. y OROPEZA, R.A., 2012. Determinación del color en epicarpio de tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) con visión computarizada durante la maduración. *Agronomía Costarricense*, vol. 36, no. 1, pp. 97-111. ISSN 0377-9424.
- PATEL, K.K., KAR, A., JHA, S.N. y KHAN, M.A., 2012. Machine vision system: a tool for quality inspection of food and agricultural products. *Journal of Food Science and Technology*, vol. 49, no. 2, pp. 123-141. ISSN 0975-8402. DOI 10.1007/s13197-011-0321-4.
- PATHARE, P.B., OPARA, U.L. y AL-SAID, F.A.J., 2013. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: a Review. *Food and Bioprocess Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 36-60. ISSN 1935-5130. DOI 10.1007/s11947-012-0867-9.
- PEDRESCHI, F., LEÓN, J., MERY, D. y MOYANO, P., 2006. Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International*, vol. 39, no. 10, pp. 1092-1098. ISSN 0963-9969. DOI 10.1016/j.foodres.2006.03.009.
- PHILIPS, 2017a. *¿Cuáles son las ventajas económicas de los LED con respecto a las fuentes de luz convencionales?* [en línea]. Ámsterdam (Países Bajos). [Consulta: 3 mayo 2017]. Disponible en: <http://www.lighting.philips.es/soporte/soporte-de-productos/preguntas-frecuentes/general-questions/costs/what-are-the-economic-advantages>.
- PHILIPS, 2017b. *MAS LEDtube 600mm 9W 865 T8 RS* [en línea]. Ámsterdam (Países Bajos). [Consulta: 30 marzo 2017]. Disponible en: [http://download.p4c.philips.com/lfb/4/49310833-dea8-4925-9334-a58200e28cd6/49310833-dea8-4925-9334-a58200e28cd6\\_pss\\_es\\_es\\_001.pdf](http://download.p4c.philips.com/lfb/4/49310833-dea8-4925-9334-a58200e28cd6/49310833-dea8-4925-9334-a58200e28cd6_pss_es_es_001.pdf).
- RELF, C.G., 2003. *Image acquisition and processing with LabVIEW*. Primera Ed. Florida (Estados Unidos): CRC Press. Image processing series. ISBN 978-0849314803.
- RODRÍGUEZ, G.R., MOYSEENKO, J.B., ROBBINS, M.D., MOREJÓN, N.H., FRANCIS, D.M. y VAN DER KNAAP, E., 2010. Tomato Analyzer: a useful software application to collect accurate and detailed morphological and colorimetric data from two-dimensional objects. *Journal of visualized experiments: JoVE*, no. 37, pp. 1-12. ISSN 1940-087X. DOI 10.3791/1856.
- SANGWINE, S.J. y HORNE, R.E.N. (eds.), 1998. *The colour image processing handbook*. Primera Ed. Londres (Inglaterra): Chapman & Hall. ISBN 0 412 80620 7.
- SANTOS, J. y RODRIGUES, F., 2012. Applications of computer vision techniques in the agriculture and food industry: a review. *European Food Research and Technology*, vol. 235, no. 6, pp. 989-1000. ISSN 1438-2385. DOI 10.1007/s00217-012-1844-2.
- TARLAK, F., OZDEMIR, M. y MELIKOGLU, M., 2016. Computer vision system approach in colour measurements of foods: part I. development of methodology. *Food Science and Technology (Campinas)*, vol. 36, no. 2, pp. 382-388. ISSN 0101-2061. DOI 10.1590/1678-457X.11615.
- TRUST, 2016. *Trino HD video webcam*. [en línea]. Dordrecht (Países Bajos). [Consulta: 2 febrero 2017]. Disponible en: <http://www.trust.com/es/product/18679-trino-hd-video-webcam>.
- VALOUS, N.A., MENDOZA, F., SUN, D.-W. y ALLEN, P., 2009. Colour calibration of a laboratory computer vision system for quality evaluation of pre-sliced hams. *Meat Science*, vol. 81, no. 1, pp. 132-141. ISSN 0309-1740. DOI 10.1016/j.meatsci.2008.07.009.

- VIDAL, A., 2012. Measurement of colour of citrus fruits using an automatic computer vision system [en línea]. Trabajo fin de máster, Universitat Politècnica de València, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. [Consulta: 4 abril 2017]. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27912/Tesina Anna Vidal.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27912/Tesina%20Anna%20Vidal.pdf?sequence=1).
- WU, D. y SUN, D., 2013. Colour measurements by computer vision for food quality control: a review. *Trends in Food Science and Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 5-20. ISSN 0924-2244. DOI 10.1016/j.tifs.2012.08.004.
- XU, M., DAI, S., WU, Z., SHI, X. y QIAO, Y., 2016. Rapid analysis of dyed safflowers by color objectification and pattern recognition methods. *Journal of Traditional Chinese Medical Sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 234-241. ISSN 2095-7548. DOI 10.1016/j.jtcms.2016.12.006.
- YAM, K.L. y PAPADAKIS, S.E., 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 1, pp. 137-142. ISSN 0260-8774. DOI 10.1016/S0260-8774(03)00195-X.

**ANEXOS**

**ANEXO A**

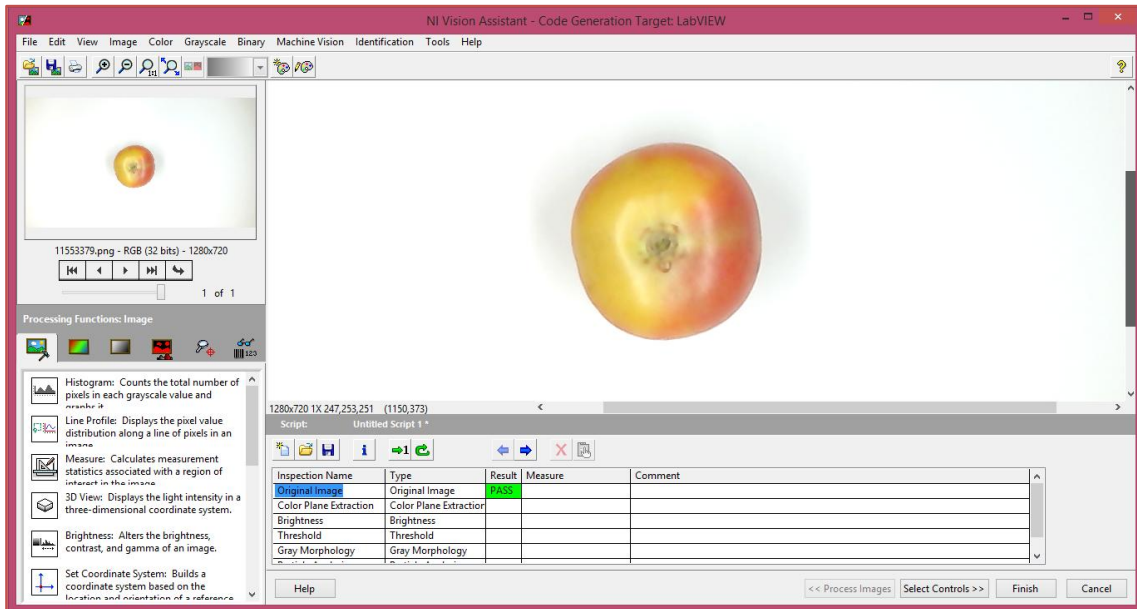
La función del programa LabVIEW así como el valor de los parámetros utilizados para la detección automática del contorno circular del tomate se muestran en la **Figura 17**.



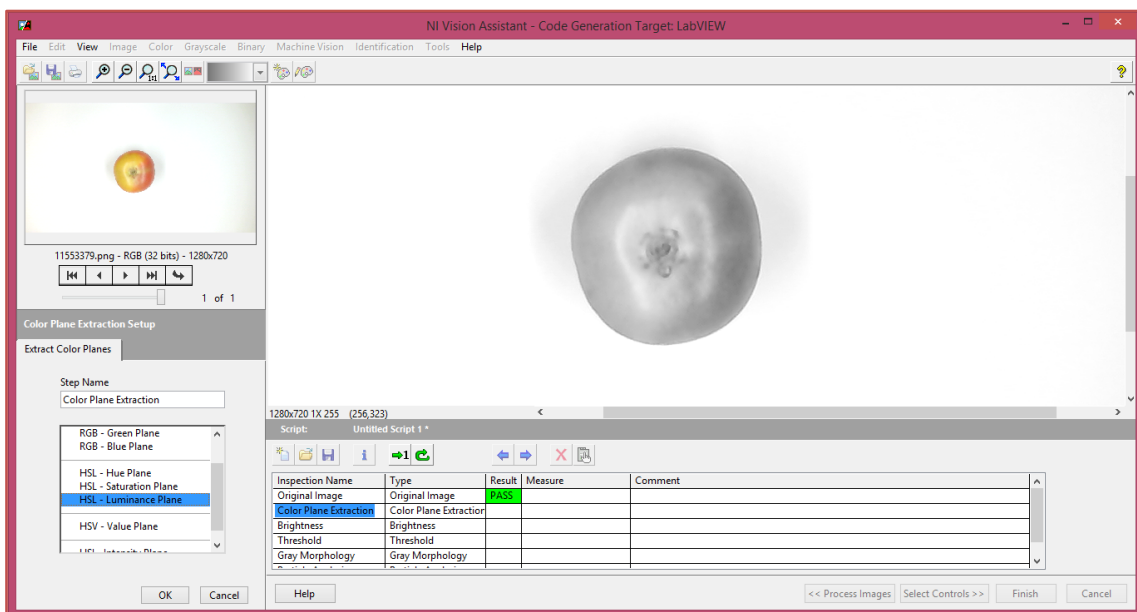
**Figura 17.** Función y parámetros utilizados para la detección automática del contorno del tomate.

**ANEXO B**

A continuació (**Figuras 18-23**) se mostren els valors utilitzats en el programa per a la realització del processament de la imatge i la adquisició de les dimensions del tomate.



**Figura 18.** Imagen original a ser procesada.



**Figura 19.** Funció utilitzada per a l'extracció dels plans de color.



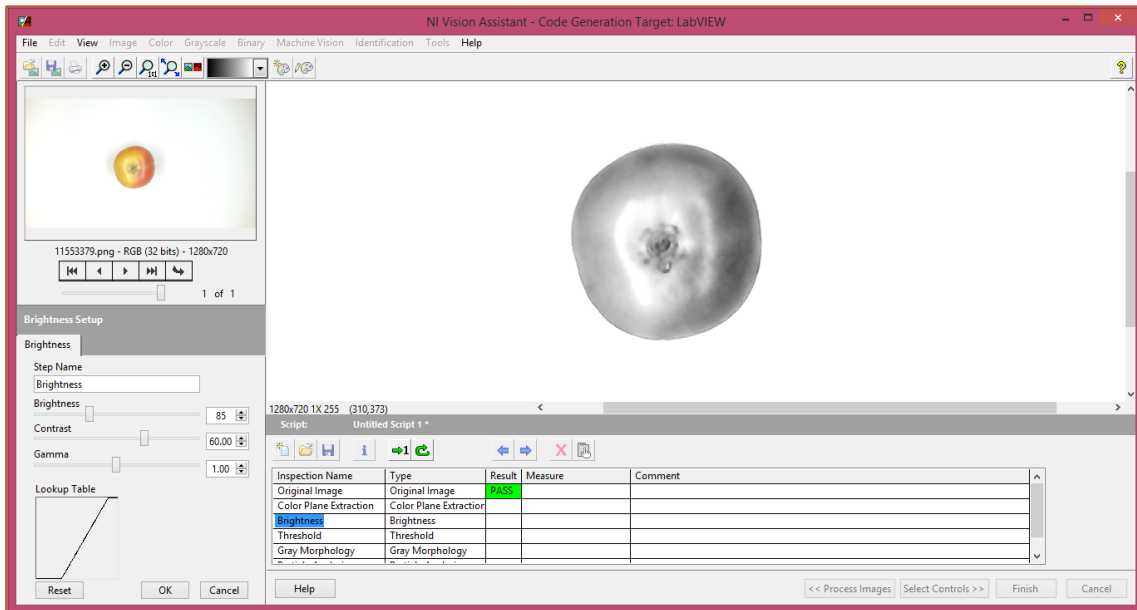


Figura 20. Función para la modificación del contraste y del brillo y los valores usados.

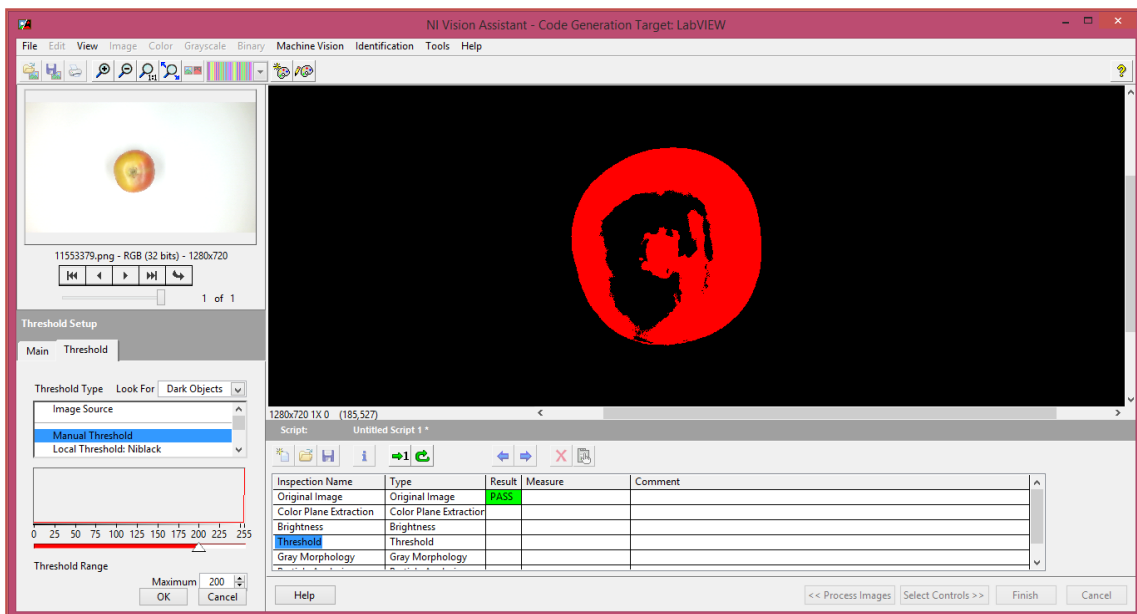


Figura 21. Umbral escogido para la binarización de la imagen.



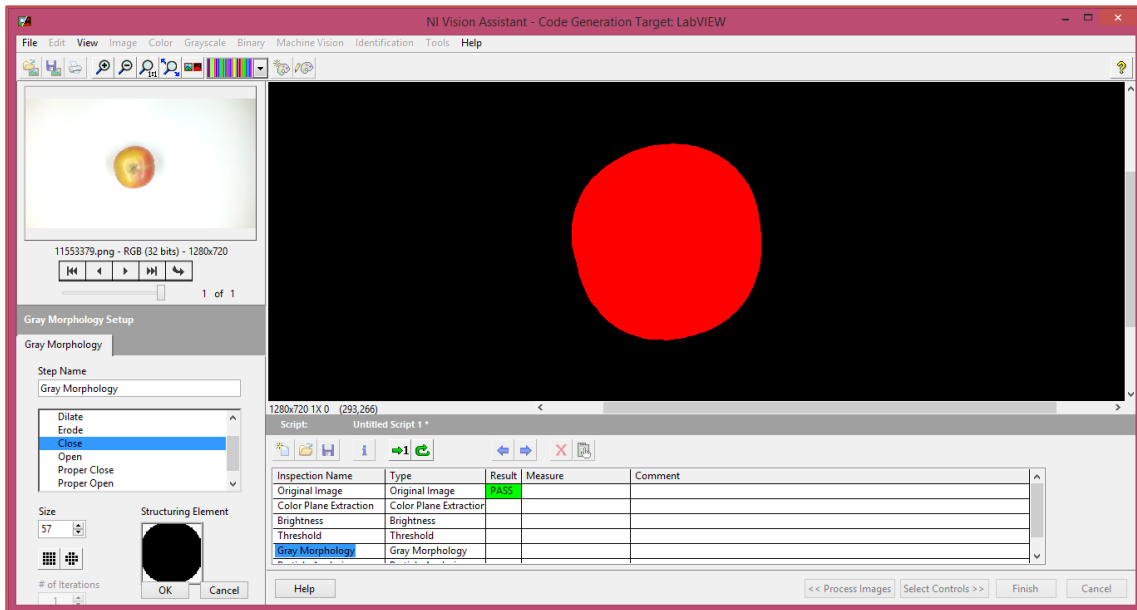


Figura 22. Valores del operador morfológico de cierre usado.

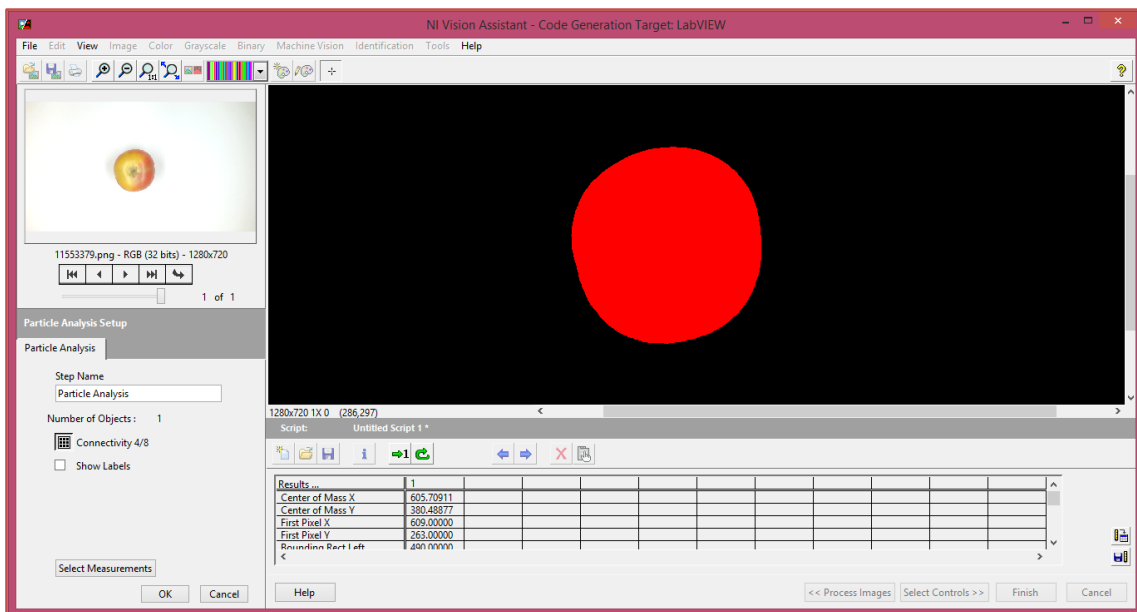


Figura 23. Función utilizada para la obtención de las características físicas.

**ANEXO C**

En la **Tabla 11** se muestran los colores medidos con el colorímetro y el SVC antes (SVC) y después de ser calibrado (SVC calibrado).

**Tabla 11.** Comparativa entre los colores medidos con el colorímetro y el SVC antes y después de ser calibrado.

Muestra	Colorímetro	SVC	SVC calibrado	Muestra	Colorímetro	SVC	SVC calibrado
1				12			
2				13			
3				14			
4				15			
5				16			
6				17			
7				18			
8				19			
9				20			
10				21			
11				22			

