



**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AGROINDUSTRIAL**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

**PREDICCIÓN DEL ESTADO DE MADUREZ DEL
TOMATE (*Solanum lycopersicum*) MEDIANTE UN
PROTOTIPO ROBOT**

Autor: Bach. Darwin Jhefferson Olivera Pérez

Asesor: Mg. Lenin Quiñones Huatangari

CHACHAPOYAS – PERÚ

2019



**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AGROINDUSTRIAL**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

**PREDICCIÓN DEL ESTADO DE MADUREZ DEL
TOMATE (*Solanum lycopersicum*) MEDIANTE UN
PROTOTIPO ROBOT**

Autor: Bach. Darwin Jhefferson Olivera Pérez

Asesor: Mg. Lenin Quiñones Huatangari

CHACHAPOYAS – PERÚ

2019

DEDICATORIA

Con mucho cariño para:

La maravillosa madre y al mismo tiempo padre que es para mí, Alicia Pérez Vásquez y mi abuelita María Estefanía Vásquez de Pérez, por todo el amor incondicional brindado, por apoyarme siempre en mis decisiones y metas que me propongo, por los consejos, apoyo moral y económico durante toda mi vida académica por ser la motivación para seguir adelante cada día.

A mis queridos tíos: Aurora Pérez Vásquez e Isidro Valqui Mendoza; a mis primos Yesica, Sarina, José, Flor, Elisbier, Richard y Carlos y a toda mi familia, por su apoyo incondicional en todo momento que los necesite.

AGRADECIMIENTOS

- En primer lugar, a Dios nuestro señor, por brindarme la oportunidad de culminar mis estudios y ser una persona profesional.
- A la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agraria, en especial a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, por inspirar con su ejemplo, brindar sus conocimientos y haberme formado profesionalmente en las aulas de esta prestigiosa Universidad.
- Al Mg. Lenin Quiñones Huatangari, investigador de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, (asesor), por darme la oportunidad, el apoyo, y las facilidades para la realización de esta investigación.
- Al Ingeniero Segundo Chávez Quintana, por su apoyo, confianza, paciencia, enseñanzas, revisiones y sugerencias brindadas para mejorar este trabajo.
- A mis compañeros y amigos por su amistad, apoyo en campo, por contribuir con su granito de arena para la realización de este trabajo; y a todas las personas que contribuyeron directa e indirectamente para que este trabajo sea posible.

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ
DE MENDOZA DE AMAZONAS**

Dr. Policarpio Chauca Valqui

RECTOR

Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

VICERRECTOR ACADÉMICO

Dra. Flor Teresa García Huamán

VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN

Msc. Erick Aldo Auquiñivin Silva

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS

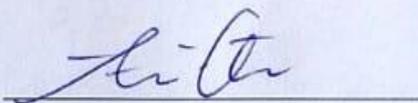
VISTO BUENO DEL ASESOR

El docente de la UNTRM-A que suscribe, hace constar que ha asesorado la tesis titulada **“Predicción del estado de madurez del tomate *Solanum lycopersicum* mediante un prototipo robot”**, del Bachiller en Ingeniería Agroindustrial egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNTRM.

✓ **Bach. Darwin Jhefferson Olivera Pérez**

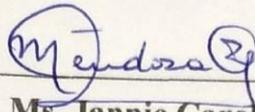
El docente de la UNTRM-A que suscribe da su visto bueno para que la tesis mencionada sea presentada al Jurado Evaluador, manifestando su voluntad de apoyar al tesista en el levantamiento de observaciones y en el Acto de Sustentación de Tesis.

Chachapoyas 5 de julio de 2019



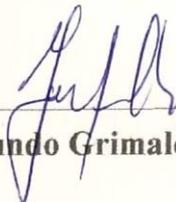
Mg. Lenin Quiñones Huatangari
Docente de la UNTRM-A

JURADO EVALUADOR



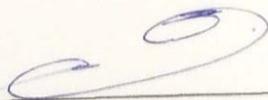
Ing. Ms. Jannie Carroll Mendoza Zuta

PRESIDENTE



Ing. Ms. Segundo Grimaldo Chavez Quintana

SECRETARIO



Ing. Ms. Ralph Stein Rivera Botonares

VOCAL



ANEXO 2-N

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS

En la ciudad de Chachapoyas, el día 15 de Julio del año 2019, siendo las 11:30 horas, el aspirante: Darwin Jefferson Olivera Pérez defiende públicamente la Tesis titulada: "Predicción del estado de madurez del tomate (*Solanum lycopersicum*) mediante un prototipo robot"

para optar el Título Profesional en Ingeniería Agroindustrial otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ante el Jurado, constituido por:
Presidente: Jannic Carroll Mendoza Zuta
Secretario: Segundo Grimaldo Chavez Quintana
Vocal: Ralph Stein Rivera Botenarez

Procedió el (los) aspirante (s) a hacer la exposición de los antecedentes, contenido de la tesis y conclusiones obtenidas de la misma, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la tesis presentada, los miembros del jurado pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones u objeciones consideran oportunas, las cuales fueron contestadas por el los aspirante (s).

Tras la intervención de los miembros del jurado y las oportunas contestaciones del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los miembros del jurado presentes en el acto, a fin de que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el jurado determinará la calificación global concedida a la tesis, en términos de:

Notable o sobresaliente () Aprobado (X) No apto ()

Otorgada la calificación el presidente del Jurado comunica, en sesión pública, la calificación concedida. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las horas 13:00 del mismo día, el jurado concluye el acto de sustentación del Trabajo de Investigación.

Mendoza
PRESIDENTE

Grimaldo
SECRETARIO

Rivera
VOCAL

OBSERVACIONES: El Tesista debe levantar las observaciones antes de presentas el empastado



ANEXO 2-0

DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO

Yo Darwin Jefferson Olivera Pérez
identificado con DNI N° 71201006 Estudiante de la Escuela Profesional de
Ingeniería Agroindustrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias
de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Amazonas.

DECLARO BAJO JURAMENTO QUE:

1. Soy autor de la Tesis titulada: Predicción del estado de madurez del tomate (*solanum lycopersicum*) mediante un prototipo robot.
La misma que presento para optar: El Título profesional de Ingeniería Agroindustrial.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. Asimismo, por la presente me comprometo a asumir además todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse para LA UNTRM en favor de terceros por motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontraren causa en el contenido de la tesis.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones civiles y penales que de mi acción se deriven.

71201006

Chachapoyas, 05 de Julio de 2019



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS	V
VISTO BUENO DEL ASESOR.....	VI
JURADO EVALUADOR.....	VII
ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS	VIII
DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ÍNDICE GENERAL	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT.....	XIII
I. INTRODUCCIÓN.....	14
II. MATERIAL Y MÉTODOS	16
2.1. ÁREA DE APLICACIÓN.....	16
2.2. PROCEDIMIENTO PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	16
2.3 TÉCNICA.....	17
2.4 ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	17
III. RESULTADOS	18
3.1. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	18
3.2. PREDICCIÓN DEL ESTADO DE MADUREZ.....	19
3.3. VALIDACIÓN DEL SISTEMA	22
IV. DISCUSIONES	25
V. CONCLUSIONES.....	27
VI. RECOMENDACIONES	28
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
ANEXOS	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Funcionamiento del sistema en campo	18
Figura 2. Diagrama de los componentes integrados en el prototipo robot.....	18
Figura 3. (a) Imagen de un tomate maduro utilizada para el análisis de color; (b)Imagen Segmentada en función al rango de pixeles de interés para un tomate maduro.....	19
Figura 4. (a) Imagen de un tomate verde utilizada para el análisis de color; (b)Imagen Segmentada en función al rango de pixeles de interés para un tomate verde.....	19
Figura 5. (a) Imagen de un tomate pintón utilizada para el análisis de color; (b)Imagen Segmentada en función al rango de pixeles de interés para un tomate pintón.....	19
Figura 6. Etapas de segmentación por cada rango establecido de pixeles de un tomate maduro.....	20
Figura 7. Imagen binarizada y sin ruido de un tomate maduro.....	20
Figura 8. Imagen de la interfaz gráfica para la predicción de la madurez.....	21
Figura 9. Modelo matemático del tipo Gompertz.....	23
Figura 10. Imágenes clasificadas como verdes	24
Figura 11. Imágenes clasificadas como pintones.....	24
Figura 12. Imágenes clasificadas como maduros.....	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de las imágenes analizadas en diferentes índices de radiación UV.....	22
---	----

RESUMEN

El color es uno de los principales atributos que se tiene en cuenta a la hora de adquirir un determinado alimento, esto debido a que es un aspecto fundamental para diferenciar frutos, determinar vida útil y poder establecer posteriores tratamientos. El presente estudio consistió en predecir el estado de madurez del tomate mediante un prototipo robot, implementado con un sistema de visión por captura de imágenes. La predicción del estado de madurez se realizó en función del color de la fruta, para lo cual se implementó un algoritmo en el software matemático Matlab R2017a. Para ello se midió el color en el sistema CIE-L*a*b*, para el análisis de datos se realizó mediante una correlación lineal simple, basado en criterios de inspección visual de los resultados obtenidos de forma cualitativa. Se obtuvo un prototipo robot que proporciona el estado de madurez del tomate, además se desarrolló una interfaz gráfica para el análisis de estas imágenes obteniendo un grado de predicción del 95%. Este trabajo se presenta como una alternativa tecnológica para el monitoreo automatizado de la madurez del tomate en campo de tal manera de tener una ventaja sobre los sistemas tradicionales existentes.

Palabras claves: procesamiento de imágenes, color, visión artificial, estado de madurez

ABSTRACT

The color is one of the main attributes that is taken into account when acquiring a food determining, this because it is a fundamental aspect to differentiate fruits, determine useful life and be able to establish subsequent treatments. The present study consisted of predicting the state of maturity of the tomato by means of a robot prototype, implemented with a vision system by image capture. The prediction of the state of maturity was made based on the color of the fruit, for which an algorithm was implemented in the Matlab R2017a mathematical software. For this, the color was measured in the CIE-L*a*b* system, for data analysis it was performed using a simple linear correlation, based on visual inspection criteria of the results obtained qualitatively. A robot prototype was obtained that provides the state of ripeness of the tomato, in addition a graphic interface was developed for the analysis of these images obtaining a prediction degree of 95%. This work is presented as a technological alternative for the automated monitoring of tomato ripeness in the field in order to have an advantage over existing traditional systems.

KeyWords: image processing, color, artificial vision, state of maturity

I. INTRODUCCIÓN

El aspecto visual en los alimentos y en especial el color, es uno de los principales atributos de calidad para tener en cuenta a la hora de adquirir un alimento (Cortés & Chirald, 2008), así mismo es muy importante para la determinación del tiempo de vida útil de un producto y de igual manera el precio que tendrá el mismo; esto influye directamente en la decisión de los consumidores para aceptar o rechazar un determinado producto.

Predecir y controlar el desarrollo del color en la superficie de las frutas son cuestiones muy importantes para la industria alimentaria. En vista a la necesidad cada vez se va exigiendo de un análisis más exhaustivo en la determinación de color en los alimentos pre-procesados y procesados en la industria agroalimentaria (Jiang et al, 2008), también es importante determinar el color de las frutas para establecer posteriores tratamientos en poscosecha, ya que el tratamiento dependerá del color de la fruta en el momento de la recolección, que se expresa como un índice de color estándar (Jiménez Cuesta et al., 1983).

Ante este problema evidente para la determinación de color, se han realizado trabajos menores desde tierra firme debido a dificultades técnicas, como es el caso de trabajar en el campo y los problemas que se refieren a una iluminación inestable, movimientos, vibraciones y energía eléctrica limitada o efectos de la intemperie (Onyango & Marchant, 2007). La tarea más complicada corresponde al desarrollo de algoritmos eficientes de análisis que permitan distinguir entre diferentes niveles de color, ajustándolos al usuario final mediante unas cómodas interfaces gráficas (Llumitasing et al., 2009).

El desarrollo de sistemas adaptados a la agricultura es fundamental para que las empresas productoras adquieran ventajas competitivas esenciales frente a terceros países con menores costes de producción. Por las razones expuestas, existe la necesidad de desarrollar una nueva forma tecnológica no destructiva y adaptable al usuario; en la inspección del color externo del producto mediante visión por computador que cubran las necesidades y que ayuden al monitoreo del tomate, convirtiéndola en un sistema automatizado, para posteriormente tomar una decisión final. Por tal razón se busca una solución tecnológica que permita optimizar los recursos económicos y técnicos de la empresa para monitorear y controlar, los mismos que por su ubicación geográfica y requerimientos se necesita de la utilización de una tecnología que se adapte a dichos entornos, es así que se plantea el desarrollo de un prototipo robot con un sistema

implementado de visión artificial como una alternativa tecnológica de solución que permita monitorear los cultivos productivos de tomate, esto significará la automatización de la misma y por ende una mejora en el sistema productivo.

Establecer parámetros de valores del color del tomate en campo mediante un modelo matemático y usando herramientas programables, que se desarrolla en un prototipo robot y se asemejen o sean iguales a los valores dados por instrumentos medibles, utilizados convencionalmente existentes, conllevaría una gran ayuda para la obtención de información de la producción de cultivo de tomate, que se verá beneficiado directamente el productor. Es importante mencionar que hoy en día la mano de obra calificada para los trabajos de monitoreo de cultivos es cada vez más escasa y costosa; para este propósito primero se diseñó y construyó un prototipo robot que tuvo como tarea capturar y transferir las imágenes de los tomates en campo para luego ser analizadas mediante sistema creado que determina la madurez del tomate en función a los rangos de colores obtenidos en las imágenes.

Figuroa & Guerrero (2016), desarrollan una herramienta computacional para la identificación del estado de maduración de granadillas a partir del reconocimiento de imágenes, el área en píxeles de las imágenes perteneciente a la fruta fue extraída mediante la técnica de Otsu usando librerías de OpenCv en Python, los resultados obtenidos muestran 92,6% de aciertos en la identificación del estado de maduración, a partir de un conjunto de 90 imágenes obtenidas de 90 frutas en diferentes estados de maduración, en comparación con el análisis manual.

Herrera et al. (2016), propone un sistema de visión artificial para la detección del fruto de café apto para producción. Para lograr esta detección se desarrollaron dos algoritmos, uno encargado de clasificar los frutos en maduros o no maduros, y otro que detecta la presencia de la plaga de la broca, los resultados mostraron una efectividad del 87%,

Sáenz (2016) plantea el desarrollo de dos algoritmos de procesamiento de imágenes para la identificación del café idóneo para producción, uno de acuerdo al color de este y otro para detectar la plaga de la broca y Velasco, Pérez & Flórez (2014) proponen una metodología de ingeniería en automatización aplicada al diseño, construcción y caracterización de una estación de clasificación automática con visión de máquina, usa la librería de procesamiento óptico digital de imágenes Open CV, que permite experimentar el sistema de clasificación de café., obteniendo resultados con una efectividad del 91%.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de aplicación

Esta investigación se realizó en la estación experimental de cultivos del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva INDES-CES, ubicado dentro de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza. Se realizaron las respectivas pruebas en el campo de estudio. El prototipo recorrió una hilera de 25 plantas, de allí se obtuvieron los resultados, que se muestran en la tabla 1.

2.2. Procedimiento para el procesamiento de imágenes

El proceso a través del cual se extrae una imagen de interés y se produce una versión modificada de la misma por medio de algoritmos para su posterior análisis. Las imágenes extraídas fueron capturas en un campo de simulación de cultivo de tomate, las imágenes fueron tomadas en diferentes horas y en distintos índices UV, utilizando el dispositivo móvil Huawei Nova Plus que cuenta con una cámara principal con sensor de 16 megapíxeles, apertura focal f/2.0, estabilizador óptico de imagen; las imágenes fueron procesadas usando un procesador Intel Core i7 2.0 GHz, 8 GB RAM y Windows 8.1 Pro (64-bits) y el programa Matlab de MathWorks (2017), versión 8.5 (R2017a), se siguieron los siguientes pasos.

Adquisición de la imagen

Se realizó el desplazamiento en campo y se tomaron cincuenta fotografías, con la cámara puesta en el prototipo robot, tomando una distancia de 60 centímetros del objetivo. Las imágenes digitales fueron obtenidas y almacenadas por el dispositivo móvil. Las características de la captura de las imágenes fueron con una saturación +5, contraste +5, brillo +5, con una resolución de 4608x3456 píxeles en el modelo de color RGB (Red Green Blue) y en formato jpg. Para el análisis de procesamiento se siguió la secuencia de la captura de las imágenes.

Segmentación

Posterior a la adquisición de imágenes, se realizó una segmentación en función a métodos basados en regiones de píxeles contiguos con el mismo valor dentro de una imagen binaria. Para realizar esta segmentación primero se debió tener la imagen binarizada, convertirlo en valores de uno o cero.

Operaciones morfológicas

La operación de Apertura y filtro, fueron aplicados sobre la imagen binaria para remover pequeños parches y pixeles aislados. El resultado es una imagen binaria más limpia y sin ruidos, esto facilita una mayor precisión a la hora de analizar la imagen.

Medición

Se realizó una extracción de las características del color en el espacio CIEL*a*b* en un rango de pixeles por cada estado de maduración del tomate para poder cualificarlas.

Interpretación

De acuerdo con los valores obtenidos por la imagen a analizar y en función en los rangos establecidos en donde estas se encontraban, se determina la maduración del tomate, clasificándolo en tres estados de maduración (verde, pintón, maduro). Esta interpretación se lleva a cabo mediante una interfaz gráfica GUIDE, donde el usuario corrobora que la información es verdadera o falsa.

2.3 Técnica.

Grado de predicción: Comparando los resultados definidos por el software y la verificación visual de las imágenes analizadas, se calculó la cantidad de aciertos y desaciertos de los resultados para así obtener el grado de predicción.

$$\text{Grado de Predicción} = \frac{\text{total de imagenes} - \text{desaciertos}}{\text{total de imagenes}} \times 100$$

Índice UV: Para obtener este dato climatológico, se obtuvo como referencia la página web <http://accuWeather.com> El índice UV tiene valores en intervalos de 0 a 10, siendo 10 el máximo valor que denota una nubosidad nula.

2.4 Análisis de los datos.

Para el análisis de los datos se realizó una correlación lineal simple y para la modelación de los datos obtenidos se utilizó el Modelo matemático del tipo Gompertz.

III. RESULTADOS

3.1. Construcción del prototipo

En la Figura 1 se presenta el prototipo robot, sus dimensiones son 22 cm. de ancho, 25 cm. de largo y 10 cm de alto y con un peso de 675 gramos. El sistema prototipo que nos facilita la captura de las imágenes a procesar está físicamente implementado y consta primordialmente de una tarjeta Arduino Uno, la cual contiene las instrucciones programadas para el despliegue del mismo (Anexo 5). La tarjeta de control está conectada a su alimentación eléctrica, una batería que otorga 9 voltios y hasta 2 Amperios en una hora. El encendido de la tarjeta se hace mediante un switch o interruptor, junto con los componentes conectados a ella (cámara, motores, driver) genera un consumo energético alrededor de 1A, así pues, el tiempo que la batería es capaz de suministrar la alimentación continua a la tarjeta es de aproximadamente una hora.



Figura 1. Funcionamiento del prototipo en campo.

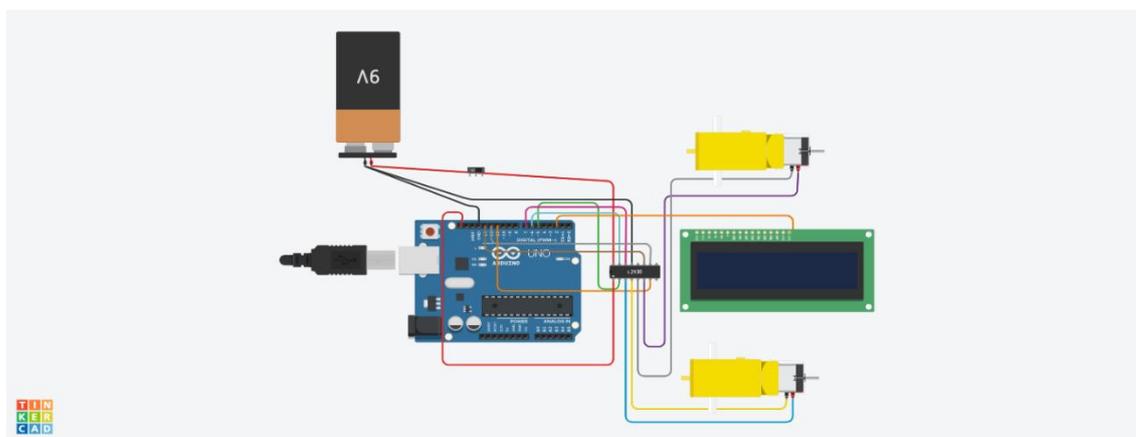


Figura 2. Diagrama de los componentes integrados en el prototipo robot.

3.2. Predicción del estado de madurez

Los resultados obtenidos mediante los algoritmos creados para la extracción de los rangos de color por cada estado de madurez del tomate en sus tres clasificaciones, se muestra en la Figura 3, 4 y 5. Se realizó la extracción de las características del color en el sistema CIE-L*a*b* para cada estado de madurez, clasificación; maduro, pintón y verde, con el propósito de tener rangos establecidos para el análisis de las imágenes (Ver anexo 4).

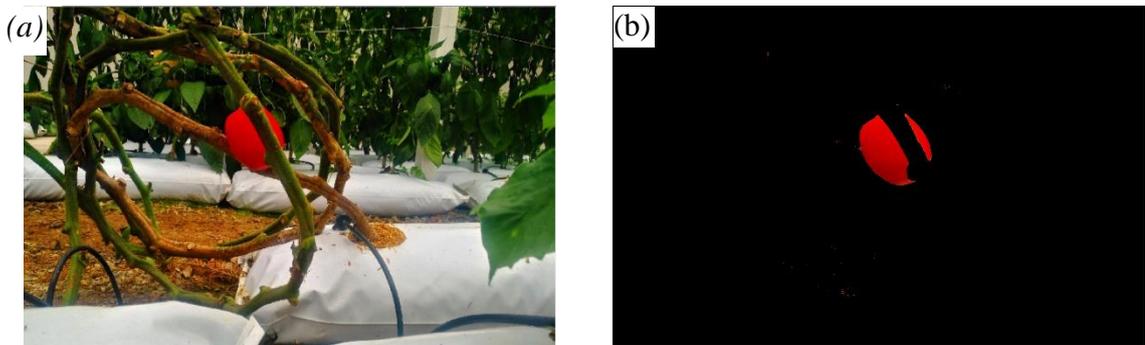


Figura 3. (a) Imagen de un tomate maduro utilizada para el análisis de color; (b) Imagen Segmentada en función al rango de pixeles de interés para un tomate maduro.

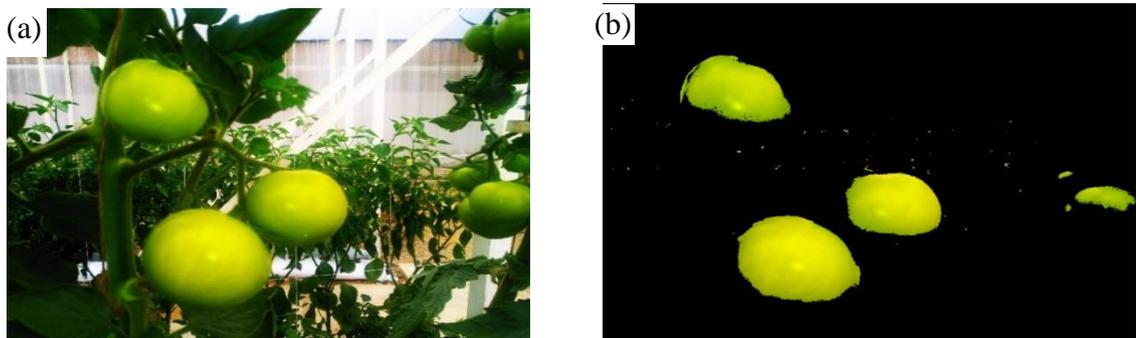


Figura 4. (a) Imagen de un tomate verde utilizada para el análisis de color; (b) Imagen Segmentada en función al rango de pixeles de interés para un tomate verde.

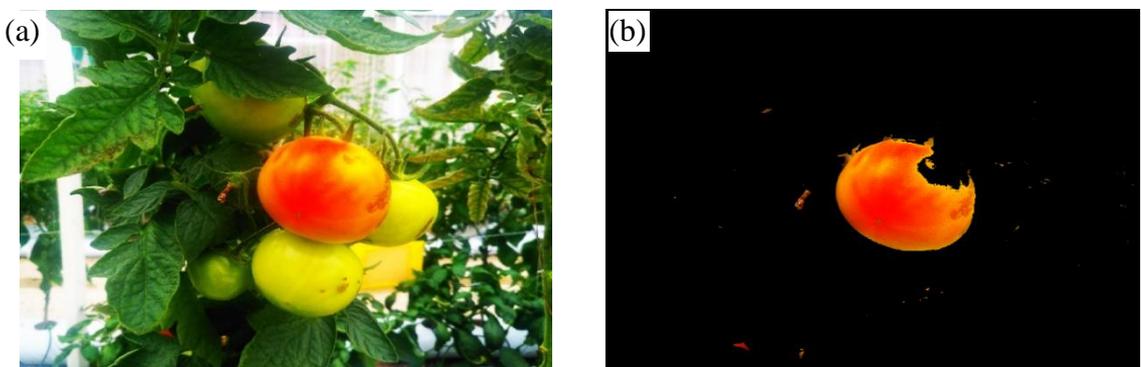


Figura 5. (a) Imagen de un tomate pintón utilizada para el análisis de color; (b) Imagen Segmentada en función al rango de pixeles de interés para un tomate pintón.

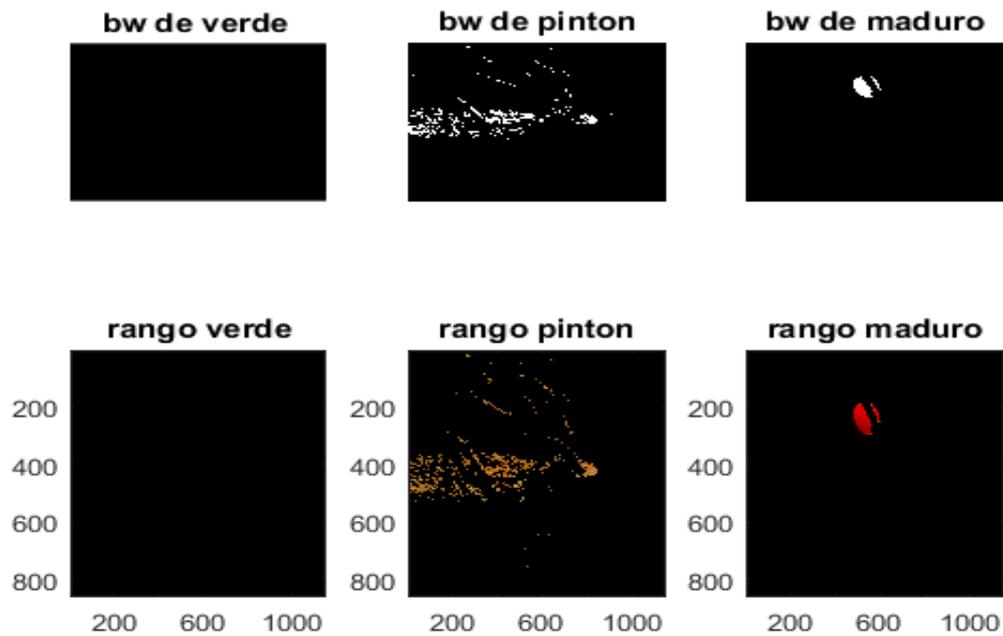


Figura 6. *Etapas de segmentación por cada rango establecido de pixeles de un tomate.*

Dado que la imagen analizada corresponde a un tomate maduro se observa que los pixeles de colores corresponden al rango maduro, como debía esperarse ya que se segmentó los colores por cada estado de madurez.



Figura 7. *Imagen binarizada y sin ruido de un tomate maduro.*

Considerando que la imagen analizada tiene mayor cantidad de pixeles en el rango de estado maduro y pintón, se observa la cantidad de pixeles dentro de estos dos rangos, posterior a esto para tomar la decisión de decir el estado de madurez se elimina los pixeles dispersos, para facilitar el análisis de la imagen, teniendo en cuenta estos puntos se realiza la decisión final.

Para la imagen que contiene más de un tomate con diferentes estados de madurez, se realizó un promedio para así determinar la maduración en función a la mayor área de

pixeles encontrados en la región establecida previamente, dando valores referenciales del estado de madurez que predomina en la imagen.

Finalmente, para facilitar la extracción de los resultados del análisis de las imágenes se desarrolló una interfaz gráfica de tal manera sea la más intuitiva para el usuario final detallando los requerimientos mínimos para su uso., La interfaz gráfica se realizó con el comando “guide” de MatLab, el cual crea dos archivos: El primer archivo *.fig (“fig file”), en donde pueden insertarse ejes, botones, deslizadores, texto de edición, menús, etc. Cada uno de los cuales tienen ciertas propiedades y realiza una función determinada. El segundo archivo, *.m donde se encuentra el algoritmo para la predicción de la madurez y toda las acciones de cada elemento de la GUI, además se puede acceder del archivo *.fig al *.m, mediante (“Callback Function”).

Interfaz de usuario consta de 7 archivos

- 5 script: El primer script está compuesta por todas las acciones del GUI, que da la bienvenida al programa (Inicio.m), el segundo script contiene la programación en lenguaje .m para predecir la madurez del tomate, y los script tres, cuatro y cinco son las funciones de los rangos determinados por cada estado de madurez, se detalla toda el algoritmo desarrollado en los anexos 1.
- 2 GUIs: La primera GUI contiene la interfaz que da la bienvenida al programa y es lo primero que el usuario va a ver (Inicio.fig) ver figura 2, y finalmente la segunda GUI nos permitirá seleccionar la imagen para obtener una clasificación de ésta.

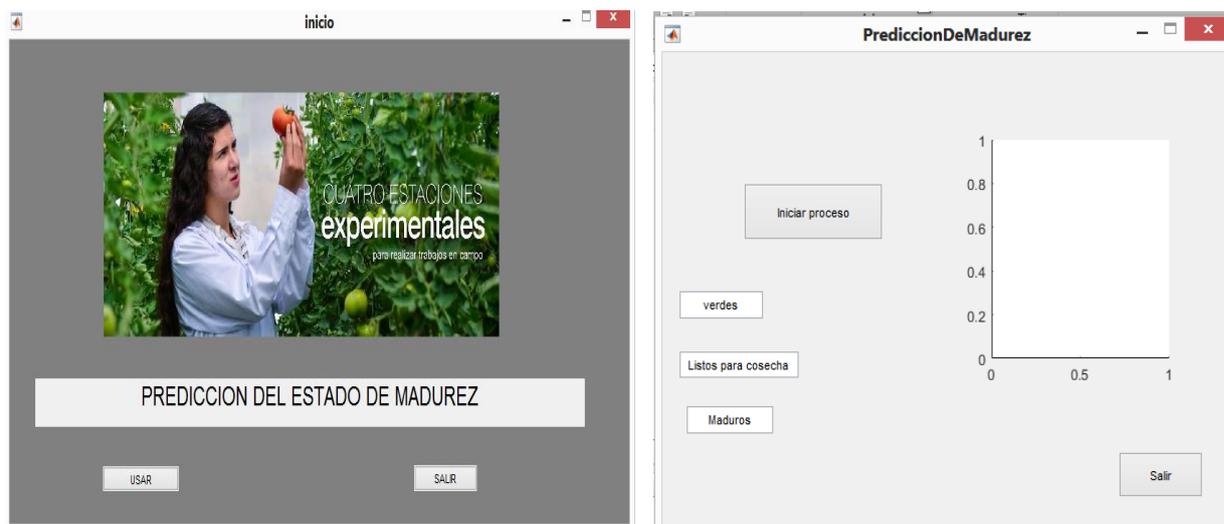


Figura 8. Imagen de la interfaz gráfica para la predicción de la madurez

3.3. Validación del sistema

Para la predicción de la madurez del tomate y tomando los rangos establecidos detalladamente por cada estado de madurez y en términos de análisis cualitativo y para propósitos de comparación basados en criterios de inspección visual del tomate se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 1: Resultados de las imágenes analizadas en diferentes índices de radiación UV

Índice UV (0-10)	Imágenes analizadas	Grado de predicción (%)
10	correctas	48
	Incorrectas	2
9	correctas	48
	Incorrectas	2
8	correctas	48
	Incorrectas	2
7	correctas	47
	Incorrectas	3
5	correctas	46
	Incorrectas	4
3	correctas	44
	Incorrectas	6
1	correctas	42
	Incorrectas	8
0	correctas	30
	Incorrectas	20

En la Tabla 1, evidenciamos una clara diferencia entre los resultados obtenidos en diferentes índices UV, se observa que a partir de un índice UV igual a 8 y mayor a este, el grado de predicción de del 95% siendo un valor alto y aceptable, manteniéndose constante desde ese punto, asimismo desde un índice UV igual a 7 y menor a este comienza a ver variaciones negativas disminuyendo el grado de predicción notablemente hasta solo obtener una predicción del 50% con un índice UV de 0, no siendo favorable para el objetivo del presente estudio.

Se determinó el coeficiente de correlación de Pearson entre la variable, grado de predicción y el índice UV, obteniéndose como resultado de 0.8373, de esta manera se prueba la influencia de las variables. Debido al comportamiento de los datos y el coeficiente de correlación de los mismos, se obtuvo un modelo matemático del tipo de la

Relación de Gompertz, (ver Figura 9), con un error estándar de 1.4430 y coeficiente de correlación (R^2) de 0.9971. Este modelo fue encontrado usando el software CurveExpert, ver ecuación (1)

$$y = ae^{-e^{b-cx}} \quad (1)$$

Donde:

x es el índice UV

y es el grado de predicción.

$a = 9.420912570631072E+01$

$b = -4.765847159582768E-01$

$c = 8.618288199064581E-01$

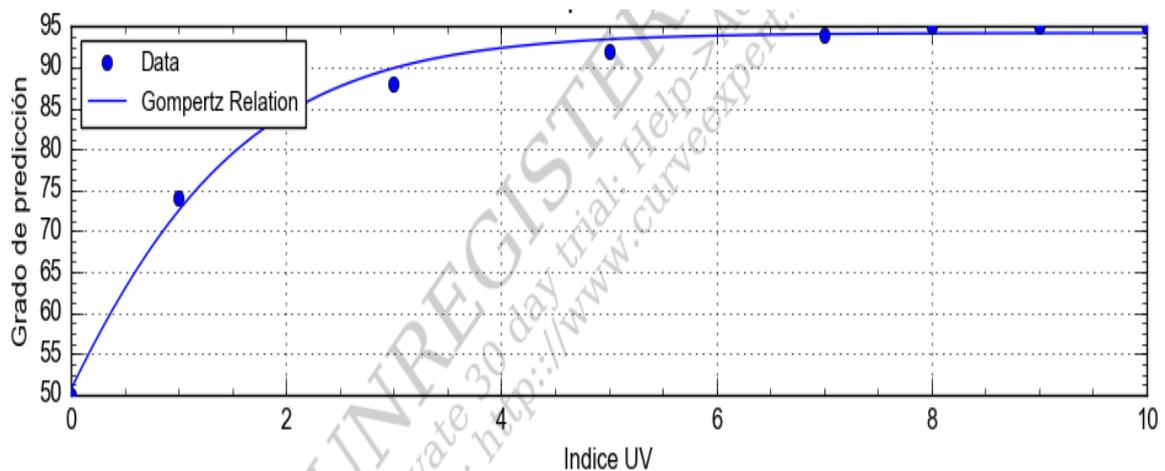


Figura 9. Modelo matemático del tipo Gompertz

A partir del modelo, se puede interpretar que el índice UV a medida que va aproximando al valor de 10, el grado de predicción va creciendo, hasta mantener un comportamiento constante al 95%.



Figura 10. Imágenes clasificadas como verdes



Figura 11. Imágenes clasificadas como pintones



Figura 12. Imágenes clasificadas como maduros

IV. DISCUSIONES

La predicción del estado de madurez de las frutas es una actividad de vital importancia en los procesos de exportación debido a que deben cumplir con los parámetros de calidad exigidos. Actualmente la evaluación convencional es subjetiva y se ve afectada por la experiencia del técnico, por el cansancio físico y la fatiga ocular. Mediante la utilización de herramientas programables como la propuesta en este trabajo se obtuvo 95% de predicción para diferenciar correctamente la maduración de los tomates, mediante el algoritmo desarrollado a partir de los datos de validación.

Las predicciones obtenidas a diferentes índices UV que se muestran en la tabla 1, reflejan la importancia de esta variable de estudio. Durante el proceso de análisis de las imágenes a fin de poder predecir la madurez de los tomates, se tomó en cuenta la iluminación a la hora de realizar la fotografía, ya que es un factor determinante para poder obtener una predicción alta y a la vez confiable, este factor es clave en la obtención de imágenes con buena resolución que a su vez facilitará la diferenciación de los colores. Por tal razón, esto explica el bajo grado de predicción encontrado en un índice UV igual a 0, que fue de tan solo el 50%, denotando un déficit en la diferenciación de colores dentro de la imagen. En definitiva, el algoritmo creado se limitó a discernir entre el color del tomate y de su entorno, en imágenes capturadas con índices UV bajos, ya que el proceso de análisis de las imágenes se vuelve más complejo dificultando la decisión final.

Baruffandi (2017), determina que, para casos de precisión y determinación de un objeto de interés con componentes espectrales de color similar, no garantiza una discriminación precisa y existe un margen de error significativo en el análisis de estas imágenes con dichas características, este mismo problema tuvo Guerrero (2015), al tratar de distinguir con el método de detección de color, entre el cultivo y la maleza, no logrando el propósito, ya que tienen rangos de color muy similares. En esta investigación para tratar de sobreponer esta dificultad, se optó por aumentar la saturación, contraste y brillo a la hora de capturar la imagen, resaltando los colores primarios, facilitando la discriminación por color. Otra alternativa de solución ante este problema evidente la plantea Bacilio (2017) refiriendo que es necesario el estudio de la forma de las hojas para poder realizar una distinción, ya que en ocasiones no es posible discernir por color, sin embargo esta propuesta podría ser controversial ya que habrá ocasiones que el fruto y la hoja tienden a tener similitud en tamaño y forma, dificultado de igual manera la clasificación.

Los trabajos en campo libre, como este proyecto siempre son afectados por la iluminación no controlada (sombras, brillos), afectando la calidad y el procesamiento de la imagen. Los colores de verde similares a los cultivos pueden ocasionar falsas detecciones. Las diferentes alturas y volúmenes de plantas, debido a varias etapas de crecimiento, también pueden crear varios problemas. Molina et al. (2019), refieren que para tener un mayor acierto ante estos problemas plantea como solución utilizar cámaras con sensor infrarrojo.

V. CONCLUSIONES

El prototipo robot pudo satisfacer los requerimientos planteados inicialmente para la adquisición y transferencia de las imágenes.

La aplicación de la herramienta programable permitió determinar el estado de maduración del tomate, con un alto porcentaje de acierto 95% como se evidenció en las pruebas con respecto a la inspección visual de las imágenes y además, podría ser adaptada para clasificar otros tipos de vegetales y frutas.

Durante el procesamiento de las imágenes se presentaron problemas debido a las condiciones de iluminación. Con respecto a esto, el presente proyecto ha demostrado que el sistema implementado en el prototipo con un escenario de índice UV igual y mayor a 8 presenta un grado de predicción del 95 % representando así resultados satisfactorios y el cumplimiento de requerimiento previstos, siendo posible diseñar e implementar un sistema de detección de bajo costo basado en visión artificial, gracias al acoplamiento a un vehículo terrestre pequeño, sencillo, liviano, y relativamente resistente para este tipo de aplicación en la agricultura.

VI. RECOMENDACIONES

De cara al futuro, sería sobresaliente la adecuación de tecnologías aplicada a energías renovables y que dé solución al total funcionamiento autónomo del prototipo, que este no requiera la intervención de una persona para el encendido y que realice su recorrido diario y que al finalizar acceda a una estación de carga automática para realizar nuevamente su ciclo de trabajo. Además, la construcción de un prototipo de mayor tamaño y con mayor capacidad de almacenaje de batería a fin de lograr el acceso a lugares donde el terreno no es plano, finalmente se podría realizar la aplicación del sistema en otros cultivos de interés.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cortés, M., & Chiralt, A. (2008). Cinética de los cambios de color en manzana deshidratada por aire fortificada con vitamin E. *Vitae*, 15(1).
- Bacilio, R. (2017). Sistema móvil para cuidado de cultivos de cacao.
- Baruffaldi, J., & Uzal, L. (2017). Redes neuronales adversarias para el reconocimiento de malezas. In *XX Concurso de Trabajos Estudiantiles-JAIIO 46 (Córdoba, 2017)*.
- Figueroa, D., & Guerrero, E. (2016). Sistema de visión artificial para la identificación del estado de madurez de frutas (granadilla). *Redes de Ingeniería*, 7(1), 78-86.
- Guerrero, H. (2015). *Sistema de visión para agricultura de precisión: identificación en tiempo real de líneas de cultivo y malas hierbas en campos de maíz* (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid).
- Jackman, P., Sun, D. W., Du, C. J., Allen, P., & Downey, G. (2008). Prediction of beef eating quality from colour, marbling and wavelet texture features. *Meat science*, 80(4), 1273-1281.
- Jiang, J. A., Tseng, C. L., Lu, F. M., Yang, E. C., Wu, Z. S., Chen, C. P., ... & Liao, C. S. (2008). A GSM-based remote wireless automatic monitoring system for field information: A case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Computers and electronics in agriculture*, 62(2), 243-259
- Jiménez, C.; Cuquerella, J., y Martínez J. (1982). Determination of a color index for citrus fruit degreening. In *Proceedings of the International Society of Citriculture/[International Citrus Congress, November 9-12, 1981, Tokyo, Japan; K. Matsumoto, editor]*. Shimizu, Japan: International Society of Citriculture, 1982-1983..
- Llumitasig, M.; Miguel, L., y Vargas C. (2009). *Estudio e implementación de un sistema de control de calidad para la detección de contaminantes superficiales de diferentes tipos de frutas usando visión artificial* (Bachelor's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Mecatrónica.).
- Molina, LL.; Luis M.; Vargas C. y Carlos E. (2019). *Estudio e implementación de un sistema de control de calidad para la detección de contaminantes superficiales de diferentes tipos de frutas usando visión artificial*. (Bachelor's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Mecatrónica.).
- Sáenz, K. (2016). Clasificación de los frutos de café según su estado de maduración y detección de la broca mediante técnicas de procesamiento de imágenes. *Revista Prospectiva*, 14(1), 15-22.
- Velasco D.; Pérez S. y Flórez M. (2014). Diseño y construcción de una estación de clasificación automática con visión de máquina. *TecnoLógicas*, 97-109.

Herrera, J.; Medina, S.; Beleño, K. y González, O. (2016). Diseño de un sistema automático de selección de frutos de café mediante técnicas de visión artificial. *Revista UIS Ingenierías*, 15(1), 7-14

ANEXOS

ANEXO 1. Código fuente para segmentación por rango de pixeles de un tomate maduro.

```
function [BW,maskedRGBImage] = createMask(RGB)
I = rgb2lab(RGB);
% Define thresholds for channel 1 based on histogram settings
channel1Min = 0.000;
channel1Max = 100.000;
% Define thresholds for channel 2 based on histogram settings
channel2Min = 30.069;
channel2Max = 79.308;
% Define thresholds for channel 3 based on histogram settings
channel3Min = -2.442;
channel3Max = 80.950;
% Create mask based on chosen histogram thresholds
sliderBW = (I(:, :, 1) >= channel1Min ) & (I(:, :, 1) <= channel1Max) & ...
    (I(:, :, 2) >= channel2Min ) & (I(:, :, 2) <= channel2Max) & ...
    (I(:, :, 3) >= channel3Min ) & (I(:, :, 3) <= channel3Max);
% Create mask based on selected regions of interest on point cloud projection
I = double(I);
[m,n,~] = size(I);
polyBW = false([m,n]);
I = reshape(I,[m*n 3]);
temp = I(:,1);
I(:,1) = I(:,2);
I(:,2) = I(:,3);
I(:,3) = temp;
clear temp
end
function polyBW = applyPolygons(J,polyBW)
% Define each manually generated ROI
hPoints(1).data = [0.000000 -0.386914;
    0.265933 -0.795063;
    0.282628 -0.541104;
    0.227772 -0.447380;
    0.120445 -0.320401];
% Iteratively apply each ROI
for ii = 1:length(hPoints)
    if size(hPoints(ii).data,1) > 2
        in = inpolygon(J(:,1),J(:,2),hPoints(ii).data(:,1),hPoints(ii).data(:,2));
        in = reshape(in,size(polyBW));
        polyBW = polyBW | in;
    end
end
end
end
```

ANEXO 2. Código fuente para segmentación por rango de pixeles de un tomate pintón.

```
function [BW,maskedRGBImage] = createMask(RGB)
I = rgb2lab(RGB);
% Define thresholds for channel 1 based on histogram settings
channel1Min = 0.000;
channel1Max = 100.000;
% Define thresholds for channel 2 based on histogram settings
channel2Min = 8.538;
channel2Max = 61.973;
% Define thresholds for channel 3 based on histogram settings
channel3Min = -21.548;
channel3Max = 78.308;
% Create mask based on chosen histogram thresholds
sliderBW = (I(:, :, 1) >= channel1Min ) & (I(:, :, 1) <= channel1Max) & ...
    (I(:, :, 2) >= channel2Min ) & (I(:, :, 2) <= channel2Max) & ...
    (I(:, :, 3) >= channel3Min ) & (I(:, :, 3) <= channel3Max);
% Create mask based on selected regions of interest on point cloud projection
I = double(I);
[m,n,~] = size(I);
polyBW = false([m,n]);
I = reshape(I,[m*n 3]);
temp = I(:,1);
I(:,1) = I(:,2);
I(:,2) = I(:,3);
I(:,3) = temp;
clear temp
end
function polyBW = applyPolygons(J,polyBW)
% Define each manually generated ROI
hPoints(1).data = [-0.422143 -0.052092;
    -0.128663 -0.238423;
    -0.209477 -0.363714;
    -0.334950 -0.434392;
    -0.428523 -0.386203];
% Iteratively apply each ROI
for ii = 1:length(hPoints)
    if size(hPoints(ii).data,1) > 2
        in = inpolygon(J(:,1),J(:,2),hPoints(ii).data(:,1),hPoints(ii).data(:,2));
        in = reshape(in,size(polyBW));
        polyBW = polyBW | in;
    end
end
end
```

ANEXO 3. Código fuente para la segmentación por rango de pixeles de un tomate verde.

```
function [BW,maskedRGBImage] = createMask(RGB)
I = rgb2lab(RGB);
% Define thresholds for channel 1 based on histogram settings
channel1Min = 2.389;
channel1Max = 100.000;
% Define thresholds for channel 2 based on histogram settings
channel2Min = -64.282;
channel2Max = 21.106;
% Define thresholds for channel 3 based on histogram settings
channel3Min = 76.752;
channel3Max = 94.410;
Create mask based on chosen histogram thresholds
sliderBW = (I(:, :, 1) >= channel1Min ) & (I(:, :, 1) <= channel1Max) & ...
    (I(:, :, 2) >= channel2Min ) & (I(:, :, 2) <= channel2Max) & ...
    (I(:, :, 3) >= channel3Min ) & (I(:, :, 3) <= channel3Max);
BW = sliderBW;
% Initialize output masked image based on input image.
maskedRGBImage = RGB;
% Set background pixels where BW is false to zero.
maskedRGBImage(repmat(~BW,[1 1 3])) = 0;
end
```

ANEXO 4. Código fuente de la interfaz gráfica para la predicción de la madurez del tomate.

```
function varargout = GuideTomate(varargin)
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
[im, direc]= uigetfile({'*.bmp; *.jpg; *.jpeg'});
seleccionar = strcat(direc, im);
im1 = imread(seleccionar); axes(handles.axes1);
imshow(im1);
set(handles.pushbutton2, 'UserData',im1);
set(handles.pushbutton1, 'Enable', 'off');

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

im1 = get(handles.pushbutton2, 'UserData');
```

```

x = imread('x.jpeg');
y = imread('y.jpeg');
z = imread('z.jpeg');
z1 = imread('z1.jpeg');

[bw1 , rgb1]= verde(im1);
[bw2 , rgb2]= pinton(im1);
[bw3 , rgb3]= maduro(im1);

bw1= bwareaopen(bw1, 3500);
bw2= bwareaopen(bw2, 3500);
bw3= bwareaopen(bw3, 3500);

figure(1), subplot(2,4,1), imshow(im1), title ('imagen procesada');
figure(1), subplot(2,4,2), imshow(bw1), title ('bw de verde ');
figure(1), subplot(2,4,6), image(rgb1), title ('rango verde');
figure(1), subplot(2,4,3), imshow(bw2), title ('bw de pinton');
figure(1), subplot(2,4,7), image(rgb2), title ('rango pinton');
figure(1), subplot(2,4,4), imshow(bw3), title ('bw de maduro');
figure(1), subplot(2,4,8), image(rgb3), title ('rango maduro');

area1 = sum(sum(bw1));
area2 = sum(sum(bw2));
area3 = sum(sum(bw3));

if area1>area2 & area1>area3 ;
    axes(handles.axes2);
    imshow(x);
end
if area2>area1 & area2>area3 ;
    axes(handles.axes2);
    imshow(y);
end
if area3>area2 & area3>area1 ;
    axes(handles.axes2);
    imshow(z);
end
if area1==area2 & area2==area3 ;
    axes(handles.axes2);
    imshow(z1);
end

```

ANEXO 5. Código fuente del prototipo robot para la captura de imagen y el recorrido.

```

// Entradas de Motores A
int enA = 11; //PWM
int in1 = 13; // controla el sentido de giro
int in2 = 12; // controla el sentido de giro

```

```

// Entradas de Motores B
int enB = 5; //PWM
int in3 = 7; // controla el sentido de giro
int in4 = 6; // controla el sentido de giro
boolean flip = false ;
int pin = 2;

void setup() {
  // Configuramos los pines como salida

  pinMode(enA,OUTPUT);
  pinMode(enB,OUTPUT);
  pinMode(in1,OUTPUT);
  pinMode(in2,OUTPUT);
  pinMode(in3,OUTPUT);
  pinMode(in4,OUTPUT);
  pinMode(pin, OUTPUT);
  //digitalWrite(2 ,LOW);

void Prueba1()
  //esta prueba gira ambos motores en ambas direcciones a una velocidad fija
  //gira el motor A y B en sentido horario
  digitalWrite(in1,LOW);
  digitalWrite(in2,HIGH);
  // velocidad de 150
  analogWrite(enA, 250);
  digitalWrite(in3,LOW);
  digitalWrite(in4,HIGH);
  // velocidad de 150
  analogWrite(enB, 250);
  delay(1000);
  //apagamos los motores

  digitalWrite(in1,LOW);
  digitalWrite(in2,LOW);
  digitalWrite(in3,LOW);
  digitalWrite(in4,LOW);

void Prueba2()
  digitalWrite(pin ,flip);
  flip = !flip;
  //delay(0.5);
  flip = flip;
void loop()
  Prueba1();
  delay(3000);
  Prueba2();
  delay(1000);

```