

MÉTODOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA ESTIMACIÓN DE ATRIBUTOS INTERNOS Y EXTERNOS DE CALIDAD Y MADUREZ DE UN FRUTO-UNA REVISIÓN

Destructive and non-destructive methods for the estimation of internal and external attributes of quality and ripening of a fruit-a review

Lucía Limones-Pérez, Luis Miguel Contreras-Medina

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
lucia.limones.perez@gmail.com

RESUMEN

El color es uno de los principales atributos de un fruto para determinar su calidad y con ello su valor nutricional. A través de la coloración es posible estimar otras características sensoriales tales como el olor y el sabor que éste pueda tener; estas características tienden a determinar la aceptación de los alimentos por parte del consumidor. En esa tesitura, los carotenoides pertenecen a la familia de los pigmentos presentes en las frutas y verduras que son responsables de la coloración amarillo-naranja-rojo de los diversos frutos. Para su cuantificación se han empleado técnicas tanto destructivas como no destructivas, que permiten medir así los atributos internos de las plantas con el objetivo de conocer la calidad interna y externa de un fruto. En consecuencia, el presente trabajo está basado en una descripción de técnicas y su aplicación en la industria agroalimentaria, de tal manera que pueda ser posible llevar a cabo una estimación de la calidad interna y externa del fruto, así como la definición de su etapa de maduración y determinación del tiempo óptimo de cosecha.

Palabras clave: técnicas no destructivas, color, calidad, cosecha, madurez, carotenoides.

ABSTRACT

One of the main attributes of a fruit is the color, it is mainly used for the estimation of quality and nutritional value. Through coloration, it is possible to estimate other sensory characteristics such as smell and flavor that the fruit possesses. Those characteristics strongly intervene in the acceptance of the food by the consumer. On that subject, carotenoids are part of the pigments family present in the composition of a plant or fruit. These compounds are responsible for the yellow-orange-red coloration of mainly fruits. For its quantification both destructive and non-destructive techniques have been applied, to measure the internal attributes

of plants in order to determine the internal and external quality of the fruit. Therefore, the present review will be mainly based on the description of these techniques and how they can be applied in the agri-food industry, in such a way that makes it possible to carry out the estimation and determination of the optimal harvest time.

Keywords: non-destructive techniques, color, quality, harvest, ripening, carotenoids.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), determinar la calidad de un fruto es sumamente complejo, ya que depende de la percepción generada por los sentidos, que lo asocian a experiencias previas de sabor, textura o aroma. Dichas cualidades estarán estrechamente relacionadas con factores como el clima, riego, suelo, variedad, fertilización, etcétera, [1]. Por ende, se deben determinar cuidados específicos durante la etapa de crecimiento del fruto, de lo contrario, pueden surgir defectos morfológicos o fisiológicos que afecten la calidad interna y externa [2].

Gracias a la multiplicidad de tipos de suelos, climas y ecosistemas de México es posible la elaboración de una gran variedad de productos agrícolas, tanto para consumo interno como para exportación en mercados internacionales. Aunado a eso, los productos agrícolas mexicanos gozan de gran demanda debido a su calidad. Para garantizar las cualidades de la producción nacional agrícola, México cuenta con una certificación oficial denominada: "México Calidad Suprema" [3], la cual establece a través de un procedimiento, las pautas que todo tipo de producto agrícola debe cumplir, delimitando las condiciones necesarias y suficientes para que un determinado elemento pueda ser considerado de calidad como: forma, color, textura, olor, condiciones de cultivo, etcétera.



De tal manera que para que un producto pueda ser exportado debe de cumplir con cada una de estas normas, lo que permite así su entrada a los estándares internacionales de calidad. Entre los productos agrícolas de mayor exportación se encuentran el maíz, la caña de azúcar, aguacate, pasto, sorgo, chile verde, tomate, alfalfa, trigo y papa, aportando entre 12-20 mil millones de pesos cada uno a la economía mexicana, a excepción de la caña de azúcar y el maíz, ya que van de 26-72 mil millones de pesos [4]. La calidad de un producto puede determinarse de diferentes maneras tal como se muestra en la Figura 1, cuya evaluación se lleva a cabo a través de métodos subjetivos (como los paneles de degustación) o bien por métodos objetivos (ensayos fisicoquímicos).



Figura 1. Rubros de calidad de un producto agrícola, obtenido de Universidad de Alicante (s.f.)

Usualmente, la manera de determinar si un fruto se encuentra listo para ser cosechado o no se realiza de manera subjetiva: personal experto determina cuándo un fruto está maduro por medio de la cuenta de los días después de su florecimiento o bien por los cambios en su coloración, firmeza y aroma. Estas decisiones suelen tomarse sin conocer los atributos internos que constituyen el fruto y pueden o no cumplir con los criterios de calidad establecidos.

El principal atributo observable durante la maduración de un fruto es el cambio en su coloración. Según algunos estudios, existen ciertas relaciones entre su percepción y otras características sensoriales que intervienen en la aceptación del consumidor con los alimentos, tales como color-sabor, color-olor, color-maduración, etcétera. El cambio de coloración se debe principalmente a tres clases de pigmentos denominados clorofilas (coloración verde), carotenoides (coloración roja-amarilla) y antocianinas (coloración azul-violeta) [6]. Retomando lo previamente expuesto, a través de los cambios en la coloración de un fruto es posible estudiar y analizar la evolución de las distintas etapas de maduración de una planta, así como sus cambios fisiológicos. En cuanto a esto los carotenoides son los más representativos, encontrándose con mayor frecuencia en la naturaleza, donde al menos 700 son conocidos y divididos en dos grandes grupos: los carotenos y las xantofilas [7].

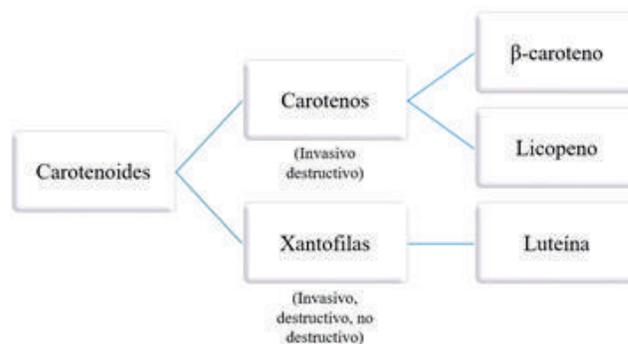


Figura 2. Clasificación de los carotenoides

Dentro del grupo de los carotenos se encuentra el β -caroteno que actúa como sustrato para la síntesis de vitamina A y otorga la pigmentación amarillo-naranja. Un ejemplo de su presencia se encuentra en las papas y en las zanahorias. El licopeno muestra una alta actividad antioxidante contra especies reactivas de oxígeno y otros radicales libres, evitando así la aparición de enfermedades degenerativas [8] y a su vez otorgando la pigmentación roja en frutos como el tomate, la sandía, toronja, fresas, entre otras frutas [9].

Debido a que el cuerpo humano es incapaz de sintetizar por sí mismo carotenoides, pero sí de llevar a cabo su metabolización a vitamina A, la única fuente de ingreso a nuestro cuerpo es por medio de su ingesta, que otorga una alta cantidad de antioxidantes, vitaminas y minerales, los cuales conllevan grandes beneficios a la salud humana como mejora de la vista, salud intestinal, así como reducción en problemas de la piel, infecciones, etcétera [10]. Algunos expertos en neurobiología (Covarrubias, Pomares, Abreu, Ortiz, M. y Aguilar, 2018) vinculan los carotenos, en especial el licopeno, con la prevención de diferentes tipos de cáncer como de pulmón, próstata, tumores, arterosclerosis, entre otros [12]. Además de prevenir ataques cardíacos hasta un 25% [13].

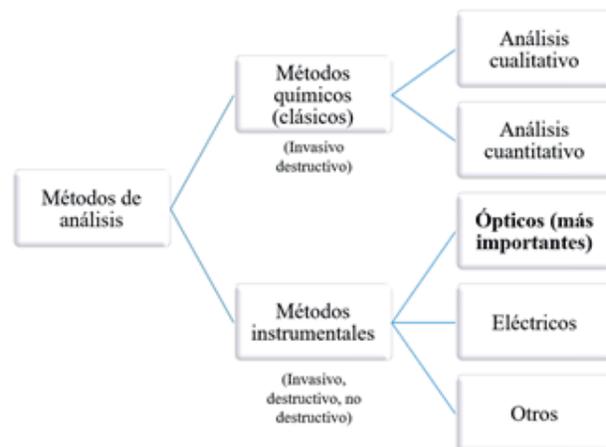
En consecuencia, es de suma importancia contar con frutos de calidad, ya que de ello dependen sus concentraciones de carotenos y otros compuestos. Así mismo, es fundamental pautar los tiempos para que la cosecha sea óptima y para evitar la recolección de frutos cuando éstos se encuentran inmaduros, lo que ocasiona mal sabor, o muy maduros, lo que genera una apariencia pobre y corto tiempo de vida. Al respecto, una forma precisa de determinar si un fruto es de calidad tanto sensorial como nutrimental es por medio de pruebas químicas, con las cuales podemos obtener información acerca del porcentaje de humedad, grasas, proteínas, aminoácidos, triglicéridos, azúcares, vitaminas, etcétera. Para llevar a cabo este tipo de pruebas es necesario tomar una porción de la muestra y prepararla, lo que puede resultar lento y costoso, además de que involucran la destrucción total o parcial de la muestra y requiere que el personal que realice estas mediciones se encuentre capacitado.

Actualmente se han desarrollado técnicas ópticas no destructivas para la estimación de compuestos y determinación del tiempo óptimo de cosecha, entre ellas se encuentra la espectroscopia, imágenes espectrales, imágenes 2D, etcétera. Este resumen se basa principalmente en la descripción de estas

técnicas y cómo han sido aplicadas a la industria agrícola en el estudio de compuestos y sus actividades antioxidantes en diferentes tipos de cultivos. De tal manera que pueda ser posible llevar a cabo una estimación de la calidad interna y externa del fruto, así como la definición de su etapa de maduración para establecer un tiempo óptimo de cosecha.

Métodos de análisis

En los últimos años, algunos investigadores enfocados al área de agricultura de precisión se han enfocado considerablemente en el desarrollo de nuevas técnicas que permitan medir los atributos de diferentes tipos de plantas y frutos, ya sea la morfología de sus hojas o bien sus atributos tanto internos como externos. Estos métodos de análisis se dividen en dos grupos, los métodos químicos, también conocidos como métodos clásicos, y los métodos instrumentales. Estos últimos se enfocan principalmente en los ópticos, ya que permiten la estimación de compuestos y análisis de calidad de diversos alimentos sin la necesidad de destruir el fruto, según sea el caso [5].



no destructivos, modificado de [5].

Entre las frutas que más se han utilizado para el estudio de la relación entre maduración-color o bien, entre color y la presencia de algunos compuestos están los tomates, manza-



nas, fresas, frambuesas, duraznos, nectarinas, mangos, plátanos, naranjas y piñas.

Métodos invasivos y destructivos

Anteriormente, para determinar la calidad de un fruto y su composición química, se llevaban a cabo pruebas químicas que, a pesar de su gran exactitud, requerían de la destrucción total o parcial de la muestra, así como el contar con un laboratorio apto para desarrollarlas. Este tipo de técnicas son comúnmente conocidas como métodos invasivos destructivos, los cuales consisten en separar la parte de interés de una planta para posteriormente analizarla en un laboratorio. El procedimiento para llevarlo a cabo se muestra en la Figura 4.

Este tipo de técnicas son conocidas como métodos sencillos, si se tiene la instrumentación correcta, ya que aportan información de los parámetros globales de los alimentos que usualmente se utilizan para dar a conocer la información nutrimental del fruto o producto, enfocado principalmente en la calidad y procesado del alimento. A continuación, se exponen en la Tabla I el uso de métodos químicos utilizados en [5] para obtener algunos atributos de calidad en alimentos como porcentaje de humedad, cenizas, proteínas tota-

les, azúcares, acidez y fibra total, la cantidad de metales en los alimentos y la cantidad de compuestos tales como clorofila, licopeno y β -caroteno, se muestra al mismo tiempo el motivo por el cual es necesario llevar a cabo estas pruebas para la industria alimentaria.

Algunos investigadores de la Universidad de Nuevo León como Candelas y Guzmán [14], muestran algunas aplicaciones de la cromatografía líquida donde compararon el contenido de licopeno en el jugo de tomate fresco con respecto al obtenido mediante secado por aspersión; seleccionaron un tomate que fue exprimido para conseguir su jugo para así posteriormente deshidratarlo con el propósito de determinar su concentración de licopeno en $\mu\text{g/g}$ tanto en el jugo de tomate como en el polvo. Así mismo se llevó a cabo la optimización del método de HPLC para la determinación de licopeno y β -caroteno en diferentes frutas y verduras [15].

Diversos investigadores de alimentos y de biotecnología de la Universidad de Sonora Bueño-solano como Campas-baypoli *et al.* [17] encontraron que por medio del uso de técnicas de HPLC es posible la cuantificación específica de la vitamina B2, también conocida como Riboflavina, trabajando principalmente con productos derivados de la leche.

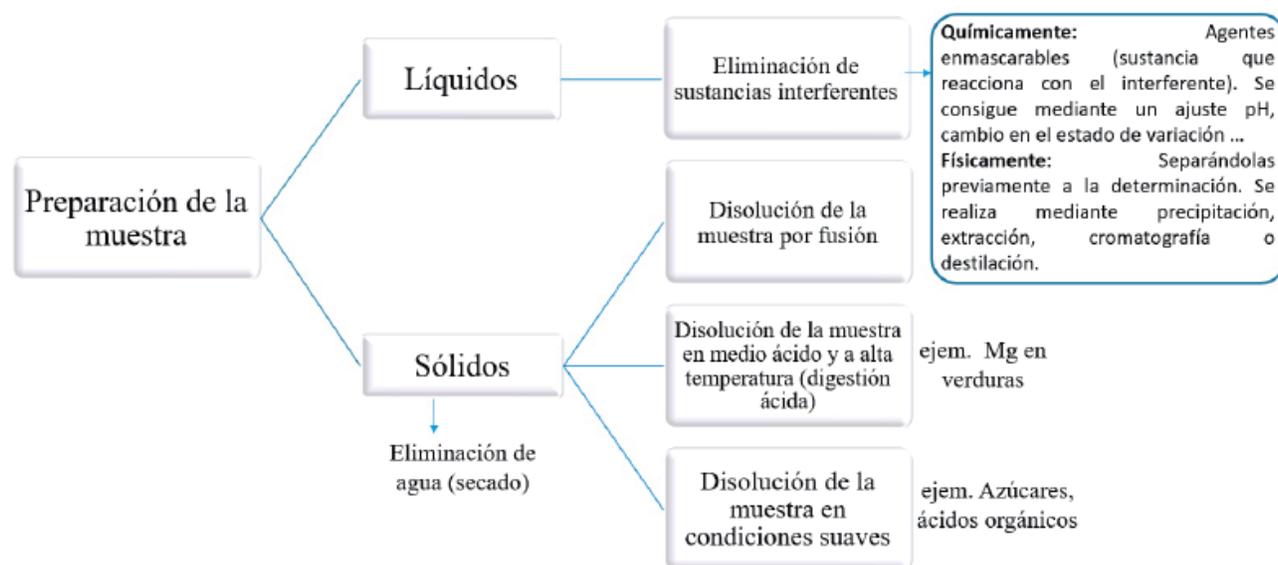


Figura 4. Método de preparación de una muestra líquida y sólida, modificado de Universidad de Alicante (s.f.).

Tabla 1. Medición de atributos de calidad mediante diferentes métodos químicos [5].

Atributo	Método	Propósito	Ejemplo
Humedad (%)	<ul style="list-style-type: none"> •Evaporación •Destilación •Vacío 	<ul style="list-style-type: none"> •Etiquetado •Estabilidad de microorganismos •Calidad y procesado del alimento 	<ul style="list-style-type: none"> •Pepino 96% •Yogurt 89% •Aceite vegetal ~0%
Cenizas (%)	La muestra se muele hasta que el tamaño de partícula sea lo suficientemente pequeño, se seca 1-10 g, desengrasar	<ul style="list-style-type: none"> •Etiquetado •Estabilidad de microorganismos •Nutrición •Calidad y procesado del alimento 	<ul style="list-style-type: none"> •Alimentos frescos < 5% •Alimentos procesados hasta 12%
Proteínas totales	<ul style="list-style-type: none"> •Kjeldahl •Biuret 	<ul style="list-style-type: none"> •Fuente de energía •Contienen aminoácidos que no se sintetizan por el organismo (lisina, triptófano, metionina, leucina, isoleucina y valina) •Enzimas que aceleran procesos biológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> •6.25: Maíz, carne, huevos •6.38: Leche •5.83: Trigo, cebada, avena •5.70: Harina de trigo •5.30: Nueces
Azúcares totales	<ul style="list-style-type: none"> •Secado a vacío, molienda, extracción de lípidos, disolución en agua o EtOH 80%, filtración o centrifugación •Espectroscopia 	<ul style="list-style-type: none"> •Atributos nutricionales (consumidores) •Detección de adulteraciones •Procesado de alimentos 	<ul style="list-style-type: none"> •Cerveza •Azúcar •Arroz •Avena
Acidez total	Pruebas de pH	<ul style="list-style-type: none"> •Composición de algunos alimentos •Aditivos como conservantes •Acidulantes •Regulan el crecimiento de algunas bacterias (sustituyen antibióticos) •Contribuyen al aroma y sabor de algunos alimentos 	<ul style="list-style-type: none"> •Zumos de limón •Vinagre •Manzanas •Zumos de tomate •Café •Cerveza •Leche
Fibra total (celulosa, pectina, lignina, almidón)	Alimento molido, separación de lípidos, separación de proteínas, separación de almidón, evaporación con EtOH 80% para precipitación de la fibra.	Atributos nutricionales (consumidor)	<ul style="list-style-type: none"> •Garbanzos •Almendras •Chocolate en polvo •Higos
Métales	Espectroscopia atómica	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos esenciales: Ca, Mg, K ... • Tóxicos a elevadas concentraciones: Se, Cu, Mn ... • Elementos ausentes: Hg, As... 	<ul style="list-style-type: none"> •Carne, pollo, sardinas •Aceite •Leche, queso •Pasta
Compuestos	<ul style="list-style-type: none"> •Cromatografía líquida (HPLC) •Cromatografía de gases (CG) 	Separación y detección de compuestos (licopeno, β -caroteno, clorofila, xantosinas, etcétera)	<ul style="list-style-type: none"> •Tomate •Zanahorias •Plátano



La estimación de Riboflavina se lleva a cabo por medio de la generación una curva de calibración con base en el contenido de Riboflavina conocido, proceso similar a la obtención de licopeno y otros compuestos en diferentes frutos. Por otro lado, tomando en cuenta que el consumo de licopeno ayuda a reducir el riesgo de adquirir enfermedades degenerativas, Olaiya y Adigun, investigadores de la Universidad de Ibadan, Nigeria [18], determinaron la cantidad de licopeno pulverizando un tomate, realizando pruebas químicas con HPLC y estudiando principalmente sus implicaciones bioquímicas en la aplicación de bio-reguladores.

A pesar de que se han realizado numerosas investigaciones en tema de la cuantificación de compuestos orgánicos por medio de HPLC y otras pruebas químicas, éstas no son las únicas que existen ya que actualmente se han realizado otras investigaciones utilizando colorímetros y procesamiento digital de imágenes donde ha sido necesario destruir la muestra para el estudio de compuestos de los frutos. En la universidad de Ohio [19], se desarrolló un analizador de tomates denominado TACT (por sus siglas en inglés Tomato Analyzer Color Test), en el que partían los frutos a la mitad para obtener sus valores R, G, B, Luminosidad, L^* , a^* , b^* , matiz, y croma por medio de una cámara con fondo negro y lo corroboraron con colorímetros y diferentes tipos de escáner. Además del tomate realizaron pruebas con papa, pepino, ciruela roja, melón, zanahoria y fresas, obteniendo un coeficiente de correlación $R^2 > 0.96$, indicando que el modelo que obtuvieron es bueno.

Este tipo de métodos suelen llevarse a cabo, a pesar de que es necesaria la destrucción de la muestra, ya que muchas veces sirven como método de validación de los nuevos instrumentos en desarrollo, principalmente, para la estimación de compuestos y otros atributos en las plantas, correlacionando los datos de las pruebas químicas con los de métodos ópticos como colorimetría [20], espectroscopia [15], imágenes [21], [22]. Esto ha aportado conocimientos para generar nuevas técnicas de medi-

ción, con el propósito de evitar en su mayoría la destrucción de la muestra, un ahorro en el análisis y el desarrollo de tecnología.

Métodos invasivos y no destructivos

El color es uno de los principales atributos que definen la calidad de un fruto porque a través de una buena percepción permite la aceptación o rechazo por el consumidor final. Sin embargo, no es un indicador de la calidad interna del fruto, ya que se encuentra mayormente relacionada con su aspecto exterior. La maduración y el cambio de coloración varía en cada fruto. Li, Lecourt y Bishop [23] indican que el cambio en la coloración de un fruto se debe a que durante la maduración se lleva a cabo un proceso de degradación de la clorofila y por otro lado existe un incremento en la concentración de otros pigmentos, tales como los carotenoides. Se observa por medio de colorímetros, imágenes 2D y el uso de los diferentes espacios de color, en especial el CIE $L^*a^*b^*$, debido a que es el que más se asemeja a la percepción real del objeto.

Este tipo de métodos no requiere de la destrucción de la planta o tomar partes de ella, más bien requiere un contacto directo para realizar las mediciones necesarias. Sin embargo, en ocasiones, este tipo de técnicas pueden llegar a interferir con el crecimiento natural de la misma [24]. Por otro lado, se encuentran los métodos no invasivos, los cuales, a diferencia del método anterior, no necesitan tener un contacto directo con la planta o fruto para llevar a cabo las mediciones, de tal manera que no afectan en el crecimiento natural del cultivo.

Colorímetros e Imágenes en 2D

Son altamente utilizados en la industria de los alimentos para determinar si los frutos están satisfaciendo los requerimientos de calidad, ya que de eso depende el agrado de los consumidores con su producto, específicamente, con las salsas de tomate para pastas, jugos, etcétera. La información entregada por este

tipo de dispositivos se basa en dos espacios de color principalmente, el CIE $L^*a^*b^*$ y el Hunter Lab.

Sin embargo, el que ha tenido mayor aceptación es el CIE $L^*a^*b^*$, ya que es el modelo cromático que utiliza la descripción de todos los colores que puede percibir el ojo humano. Este espacio de color fue introducido en 1976 por la Comisión Internacional de la Iluminación, por sus siglas en francés *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE), y sus magnitudes colorimétricas han sido derivadas matemáticamente de los valores triestímulo [25]. Este espacio contiene un sistema de coordenadas cartesianas, definidas por L , a^* , b^* , donde la L representa la luminosidad (valores de blanco-negro), a^* su posición entre rojo-verde y b^* entre amarillo-azul [26].

Diversos estudios han demostrado que existe mayor correlación de la coordenada cromática a^* con los cambios de maduración de un fruto [20], mientras que la coordenada cromática b^* se relaciona más con la maduración en duraznos [27]. Arias y Lee *et al.* [20] por ejemplo, reportaron una alta relación entre la cantidad de licopeno en los tomates con la relación a^*/b^* , por medio de modelos de regresión lineal, relacionando de esta manera la cantidad de licopeno del fruto con su maduración. De acuerdo con Vazquez-Cruz *et al.* [28], además de las coordenadas cromáticas L , a^* , b^* , la matiz es uno de los mejores parámetros para discernir entre diferentes etapas de maduración del tomate. Diversos autores [27], [29], [30], [20] afirman que la matiz es esencial para frutos como el tomate, durazno y guayaba.

Actualmente se han desarrollado colorímetros portátiles, utilizados principalmente para las evaluaciones de calidad en la industria alimentaria; para medir y clasificar el color de diversos productos de jitomate, como salsas, jugos, cátsup, pastas. También de construcción e incluso en aplicaciones textiles. Sin embargo, estos dispositivos cuentan con un área de medición pequeña, entre 8-11 mm de diámetro [31], por lo que es necesario tomar más muestras para otro tipo

de pruebas, o bien recurrir al uso de imágenes 2D para tener una imagen completa de la muestra. Debido a que los datos arrojados por el dispositivo son las coordenadas cromáticas CIE $L^*a^*b^*$, es necesario llevar a cabo un análisis extra, ya sea para determinar la etapa de maduración o los compuestos presentes (por ejemplo, el licopeno). Para ello, se hace uso de un análisis multivariable, con el propósito de obtener un modelo que permita la correlación entre los valores L , a^* , b^* con el objeto de interés. Entre estos métodos se encuentran la regresión lineal múltiple (MLR)[23][32], regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) [33], entre otros.

La visión por computadora comprende el estudio de procesamiento de imágenes con el único propósito de extraer información acerca de sus características para su interpretación con otras variables. La formación de imágenes es un proceso por medio del cual las cámaras imitan el comportamiento del ojo humano. Para ello se utilizan sensores de imagen, los cuales contienen sensores fotodiodos, entre ellos se encuentran los sensores CCD (por sus siglas en inglés *Charge Coupled Device*) y los CMOS (por sus siglas en inglés *Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Su funcionamiento se basa en realizar una conversión luz-carga, donde la luz captada por el lente de la cámara es convertida en electrones y almacenada para ser transformada en una señal de voltaje para ser amplificada por la parte electrónica de la cámara [34].

Tanto los sensores CCD como los CMOS realizan los mismos pasos, la diferencia radica en la secuencia en la que lo hacen, siendo por el momento los sensores CMOS los más utilizados por su alta calidad de imagen, en comparación con los CCD [35]. Una imagen digital se encuentra compuesta por un número finito de elementos, denominados píxeles. El espacio de color RGB asume que todos los colores son combinaciones de los tres colores primarios, rojo, verde y azul, por lo que cada color se forma por combinación de tres canales. De tal manera que el píxel de



una imagen a color se encuentra compuesta por los tres valores de rojo, verde y azul. Por medio de controladores inteligentes tales como lógica difusa o redes neuronales como PNN (Probabilistic Neural Network), GRNN (Generalised Regression Neural Network), RBF (Radial-Basis Function), MLP (Multi-Layer Perceptron) [36], es sencillo llevar a cabo el análisis de maduración y/o estimación de compuestos por medio del espacio de color RGB, de otra manera, sería complicado obtener la combinación exacta entre los parámetros R, G, B. Goel y Sehgal [37] utilizaron técnicas de lógica difusa para llevar a cabo la clasificación de tomates con respecto a su etapa de maduración, alcanzando un 94.3% de exactitud, tal como se muestra en la Figura 5.

La ventaja de este método consiste en que únicamente es necesario conocer los valores R, G y B de la muestra, ya que al utilizar un controlador difuso no es necesario el uso de ecuaciones matemáticas complejas para la clasificación, sólo es necesario definir correctamente las funciones de membresía y llevar a cabo el algoritmo de aprendizaje. Por otro lado, Dadwal

y Banga [38] trabajaron con los histogramas resultantes de los frutos maduros y los compararon con los obtenidos por imágenes digitales, consiguiendo así la clasificación de frutos. Sin embargo, gracias a los valores triestímulo, es posible cambiar de un estado de color a otro, por ejemplo, RGB a $CIE L^*a^*b^*$, de tal manera que se obtendrían los mismos valores que con un colorímetro, teniendo como diferencia que un colorímetro trabaja con áreas pequeñas de inspección a diferencia de una imagen 2D, la cual puede captar el fruto completo.

Además de la maduración y estimación de carotenos [30] es posible determinar otros atributos internos de la fruta, tales como los grados Brix, cantidad de azúcares del fruto, [39], la predicción de dulzura en las fresas [40], [41], la calidad y totalidad de sólidos solubles durante las etapas de maduración y su impacto en la calidad interna de éste, tal como lo indican diversos autores [40], [42], [33], [43] con cerezas, tomates y plátanos, respectivamente. Estas técnicas también pueden ser utilizadas para determinar el área foliar de las hojas de tomate [24], la clasificación de papas

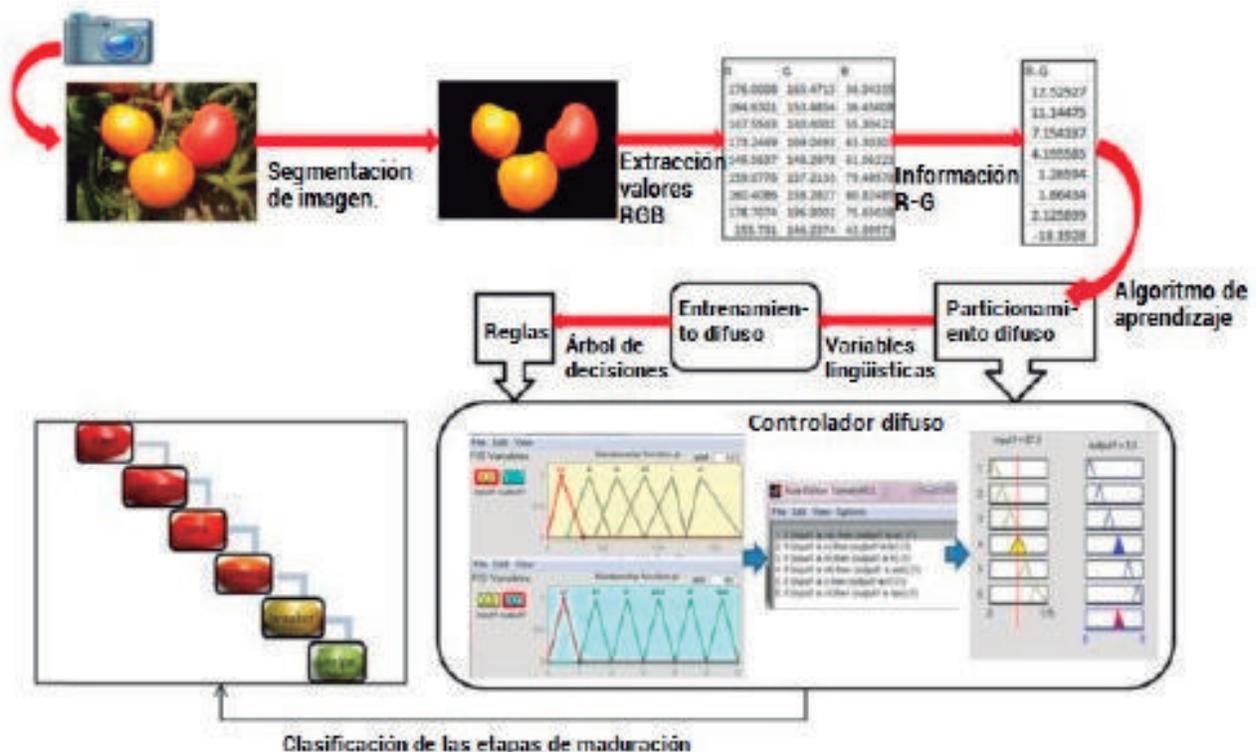


Figura 5. Clasificación de las etapas de maduración en jitomate por medio de lógica difusa

[44], la separación de fresas por forma, tamaño y color [45], la concentración de nitrógeno e índice de clorofila [46], la inspección de granos de arroz [47], la clasificación de racimos de palma aceitera [48] y la cuantificación de licopeno [49].

Así mismo, se han desarrollado robots clasificadores de fruta con respecto a su madurez de manera no invasiva con una precisión de clasificación del 94.29% [36], [37], con aplicaciones Web [50], algoritmos para discernir entre frutos, ramas, basura y otros obstáculos con una precisión de 96% [51] y la aplicación de operaciones morfológicas utilizadas como filtros para recolección de frutos en un ambiente controlado [52]. Sin embargo, estos robots únicamente se basan en la clasificación del fruto por medio de la coloración que captan los sensores de imagen dentro de ellos, mas no pueden estimar la calidad del mismo o la cuantificación de sus compuestos. Otro espacio de color comúnmente usado es el HSV (denominado así por matiz, saturación e intensidad luminosa), el cual, al igual que el CIELa*b*, otorga una

buena aproximación con respecto a la percepción del ojo humano a un objeto. Donde el valor de H define el color a detectar y la saturación describe que tan colorido es un estímulo con respecto a su propio brillo [53].

Espectroscopia VIS/NIR

Todos los cuerpos se encuentran constituidos por sustancias que se encargan de absorber y reflejar la luz blanca, por lo tanto, absorben y reflejan colores, a estas sustancias se les conocen como pigmentos. Al incidir un haz de luz sobre un objeto una parte de esa luz es absorbida y la otra parte es reflejada. De tal manera que cuando un objeto es percibido por el ojo humano como de color blanco es debido a que se refleja al 100% la luz, mientras que un objeto negro la absorbe también al 100%. Tomando lo anterior como base teórica se considera al tomate, el cual es característico por poseer una tonalidad roja, ya que absorbe el color verde y azul cuando un haz luminoso incide sobre su superficie, por lo tanto, el ojo humano únicamente recibe la

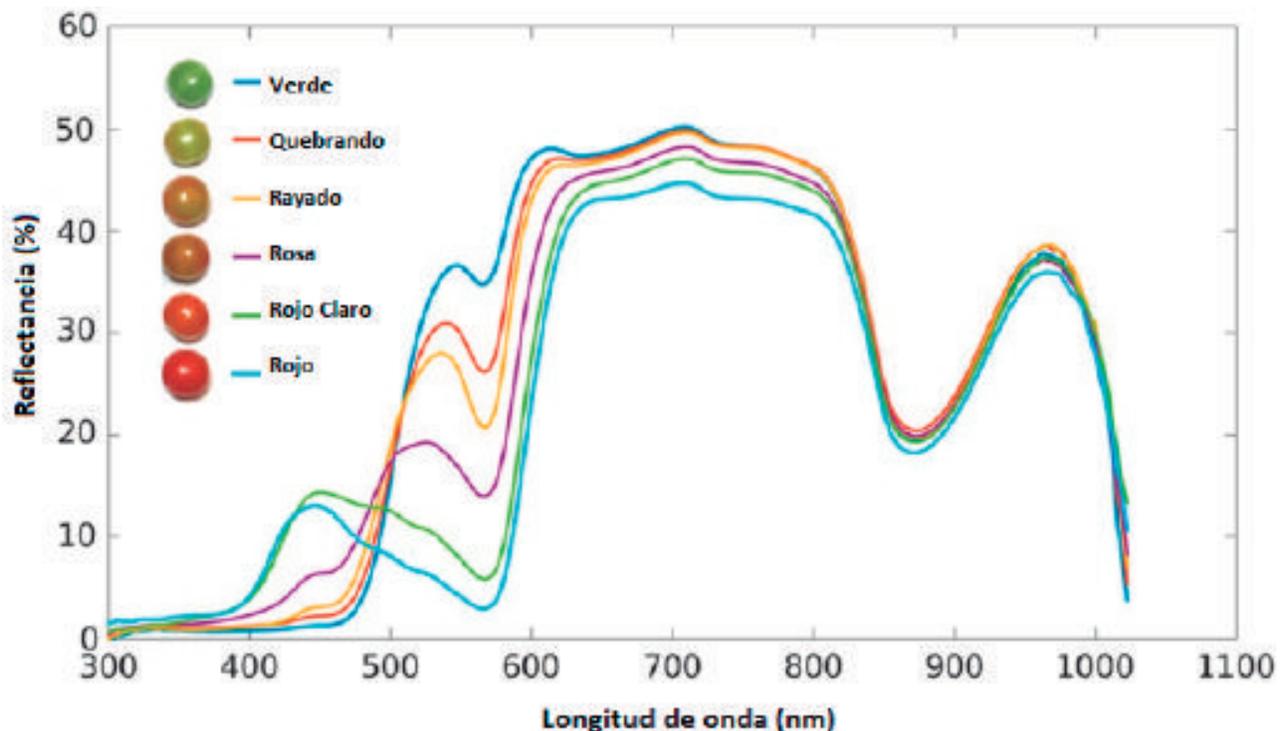


Figura 6. Cambios de reflectancia a diferentes etapas de maduración del jitomate, obtenido de Li, Lecourt y Bishop (2018).



luz roja, a diferencia del plátano que absorbe el azul y refleja el rojo y el verde, que sumados generan la tonalidad amarilla característica de los plátanos [38]. La espectroscopia visible e infrarroja se encarga de medir la reflectancia de algunos objetos entre las longitudes de onda de 380-2500 nm, lo cual depende completamente de la absorbancia de la muestra, en este caso, del fruto.

Este tipo de técnicas se utilizan principalmente para la estimación de diferentes tipos de compuestos, ya que son pruebas rápidas y no destructivas que permiten obtener una información completa acerca del fruto. Un ejemplo de esta técnica es la mostrada en la Figura 6, donde se muestra la longitud de onda utilizada y el porcentaje de la reflectancia obtenida para una muestra de tomate en sus diferentes etapas de maduración.

En la Universidad Autónoma de Querétaro, el maestro Zamudio Ramírez [21] asegura que los carotenoides pueden ser identificados por métodos espectrofotométricos con un rango de 400-500 nm del espectro visible, donde específicamente para la detección y estimación de licopeno se utiliza una longitud de onda de 530 nm. Algunos investigadores de la Universidad de Indonesia, Makky y Sonni [54], desarrollaron un espectroscopio VIS/NIR portátil para la medición de la calidad interna de racimos de palmas de olivo, el cual estaba compuesto por una caja negra con el espectroscopio montado en la superficie y una computadora portátil para el análisis de los datos. Ellos utilizaron un rango de 400-1000nm y generaron dos análisis estadísticos por medio de regresión lineal y una red perceptrón multicapa donde el modelo obtenido contaba con una R de 0.9688. En Corea del Sur, investigadores de la Universidad de Kangwon desarrollaron un algoritmo para estimación de carotenos con modelos de regresión múltiple y PLS con una R^2 del 0.97 para licopeno y 0.85 para β -caroteno [55]. A pesar de la buena estimación otorgada por estos sistemas tanto para la determinación del estado de madurez de un fruto como para la estimación de los compuestos presentes en

él, este tipo de sistemas son conocidos por ser sofisticados y costosos, debido al tipo de tecnología con la que cuentan.

Por otro lado en España, únicamente se enfocaron en el estudio de los cambios bioquímicos de un tomate en el transcurso de su maduración, donde encontraron que los compuestos con mayores variaciones durante toda la transición fueron el licopeno (aumento) y la clorofila (decremento) [56]. Así mismo se han desarrollado sistemas para la predicción de grados *Brix* en mangos, midiendo la absorción de la muestra para su estimación [47], la determinación de atributos de calidad en tomates [57], el total de sólidos solubles (TSS), la acidez (pH), la acidez valorable (TA) y el contenido de licopeno por medio de PLS [33]. Li, Lecourt y Bishop [23] afirman que para determinar la longitud de onda adecuada se selecciona la de mayor varianza en todo el espectro, pero menor colinealidad. Sin embargo, la precisión de este tipo de métodos, sobre todo para la medición de la calidad interna se encuentra influenciada por la temperatura del fruto, por lo tanto esta variable debe de ser considerada en el modelo generado [23].

Imágenes espectrales

Una imagen multiespectral (MSI) es la que captura datos de imágenes dentro de rangos de longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético, que pueden corresponder tanto al espectro visible como al infrarrojo. La obtención de este tipo de imágenes permite la extracción de información adicional que el ojo humano no captura. La imagen multiespectral divide la luz en un pequeño número de bandas espectrales (3-15). Mientras que en las hiperespectrales (HSI) a menudo hay cientos de bandas espectrales contiguas [58]. Este tipo de métodos han sido una herramienta poderosa para la inspección de calidad de un fruto, detección de enfermedades en arbustos, árboles y cultivos, detección de fallas en carretera, etcétera, de una forma no invasiva, ya que aunque es

necesario el uso de cámaras, éstas se pueden montar sobre una plataforma móvil, ya sea en un carro, un tractor, vehículos aéreos no tripulados (UAV) o bien en algún otro tipo de robot para llevar a cabo su inspección.

Al igual que las técnicas vistas con anterioridad, este tipo de técnicas lleva consigo una infinidad de datos, por lo que es necesario un análisis multivariable. En tema de optimización de la predicción de estas técnicas [23], se sugiere que para obtener mayor predicción es necesario tener una mejor dispersión espectral de las longitudes de onda seleccionadas en lugar de realizar combinaciones con técnicas de procesamiento de imágenes, incluyendo *wavelet*, *Fourier*, técnicas de estadística, entre otras, ya que en las pruebas realizadas se obtuvieron muy pocas mejoras [23].

En cuanto a sus aplicaciones se ha desarrollado un sistema basado en MSI para predicción de la firmeza y contenido de sólidos solubles (SSC) en duraznos con una R^2 de 0.94 y 0.97 [59], firmeza y TSS en fresas con R^2 de 0.94 y 0.83 respectivamente, indicando que los modelos encontrados son buenos para la estimación de estos atributos. En tema de cuantificación de licopeno, se ha utilizado MSI en combinación con métodos quimiométricos donde, utilizando PLS, se ha obtenido una R^2 de 0.938 y con redes neuronales del tipo *back propagation* una R^2 de 0.965 [60], concluyendo que la combinación de MSI con redes neuronales son una gran alternativa para la estimación de compuestos y pueden llegar a ser implementados en campo.

Las MSI son una extensión de las HSI, cuya diferencia se encuentra principalmente en que las MSI obtienen información de longitudes de onda específicas en lugar de hacer todo un escaneo completo del rango de trabajo, por otro lado, el costo de desarrollo de sistemas basados en MSI es menor que HSI, haciendo que MSI tenga mayor aplicación en el campo. Debido a lo anterior han sido mayores los estudios aplicados a la medición de atributos en plantas utilizando MSI, ya que en combinación con redes neuronales

se ha encontrado una alta correlación en la estimación de atributos de calidad, así mismo, Li, Lecourt y Bishop [23] afirman que la predicción de la firmeza obtenida con modelos generados por MSI resultan ser mayores a los obtenidos con HSI.

Sensor de gases químicos y fluorescencia

Se utiliza principalmente para la medición de clorofila del fruto, ya que la clorofila es un atributo que se va perdiendo, conforme el fruto va madurando y salen a flote otros pigmentos y para la detección de flavonoides y antocianinas. Comercialmente se ha desarrollado un fluorómetro, sin embargo, Li, Lecourt y Bishop (2018) afirman que es difícil de aplicar en el campo ya que las muestras deben de adaptarse a la oscuridad. Por ejemplo, para pruebas realizadas a papayas tuvieron que adaptarse a la oscuridad durante media hora [61].

Con este método es posible lograr una buena correlación entre la fluorescencia detectada con ciertos atributos como firmeza y SSC de manzanas frescas, clasificación de madurez en racimos de palma aceitera con una exactitud del 89.3% [62]. Por otro lado, investigadores alemanes desarrollaron un sistema de monitoreo pre y post cosecha para la estimación de madurez en tomates, monitoreando el suministro de agua para el caso precosecha y la calidad de la luz para el caso postcosecha, a partir de la medición de la clorofila del tomate [63]. Sin embargo, a pesar de las pruebas realizadas que han presentado buenos resultados, se obtuvo una baja correlación con melocotones y nectarinas [23], ya que en comparación con las manzanas éstas no fueron adaptadas a la oscuridad, haciendo que este tipo de técnicas puedan ser utilizadas principalmente en laboratorios bajo condiciones controladas.

Otra técnica novedosa, catalogada como no invasiva, fue la desarrollada por los investigadores mexicanos Durán-Acevedo, Manuel-Gualdron y Hernández-Ordoñez [64], quienes desarrollaron una nariz electrónica para determinar tres índices de madurez del



tomate de árbol, por medio de un arreglo de 16 sensores de gases químicos en conjunto con una red neuronal y la técnica PCA (análisis de componentes principales) para discriminar cada uno de los compuestos volátiles. Con la finalidad de evaluar las propiedades físicas, químicas y sensoriales (pH, grados *Brix*, sólidos solubles totales, porcentaje de ácido cítrico) de la muestra. De tal manera que el sistema alcanzó un porcentaje de exactitud de 99.886%.

CONCLUSIONES

Existen diversos métodos para la estimación de la calidad de un fruto, algunos involucran la destrucción de la muestra (pulverización, calcinación, separación de partes de ella) impidiendo su desarrollo natural. Se han desarrollado técnicas no destructivas, las cuales, dependiendo su aplicación, pueden ser invasivas o no. Este tipo de métodos presentan una sinergia con los métodos químicos, ya que para que su información pueda ser considerada verídica, es necesario recurrir a pruebas químicas, las cuales presentan la mayor exactitud. Los datos obtenidos son correlacionados con la variable de interés, de tal forma que un modelo predictivo pueda ser generado a partir de ellos. Entre los métodos no destructivos, se encuentran aquellos que son puntuales (área de estudio limitada al rango de milímetros), tal como los colorímetros, de los cuales la mayoría están basados en el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ y las técnicas de espectroscopia (RAMAN y VIS/NIR). Sin embargo, esta última a pesar de su alta precisión en la estimación de compuestos, suele conocerse como una tecnología sofisticada y de alto costo, haciéndola poco accesible para pequeños y medianos agricultores.

Para el estudio de un área superficial mayor se encuentran las imágenes 2D que, al igual que las imágenes espectrales, ya sean MSI o HSI, pueden ser montadas sobre plataformas móviles. Las imágenes espectrales suelen ser también de alto costo además de que gene-

ran una gran cantidad de conjuntos de datos, por lo que su uso se ha llevado a cabo principalmente en laboratorios y muy poco de manera *in situ*. Por tal motivo, las imágenes 2D son una buena opción no solo para la estimación de la madurez de un fruto o determinación de la calidad que éste tiene, sino que son una buena opción para el estudio de los compuestos durante sus etapas de crecimiento. Además de que es una alternativa confiable para su uso en dispositivos portátiles, ya que es una tecnología barata en comparación con técnicas de espectroscopia e imágenes espectrales que, con la generación de un buen modelo y condiciones controladas de iluminación, puede llegar a obtener una alta exactitud en la estimación de estos compuestos.

AGRADECIMIENTOS

El siguiente trabajo de investigación ha sido apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt).

REFERENCIAS

- [1] E. Kempen, *Nutrient and water use of tomato (*Solanum Lycopersicum*) in soilless production systems*. Stellenbosch University, no. December, 2015.
- [2] A. F. López, *Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas. Del campo al mercado*, pp. 95-111, 2003.
- [3] SAGARPA y Secretaría de Economía México calidad suprema, pp. 1-22.
- [4] Agrichem. (2015). Cuáles son los 10 principales productos agrícolas de México," octubre 2015. [Online]. Available: <http://agrichem.mx/cuales-son-los-10-principales-productos-agricolas-de-mexico/>.
- [5] Universidad de Alicante, " Tema 1: La Calidad de los Alimentos." [Online]. Available: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8537/3/control%20de%20calidad%20de%20los%20alimentos.pdf>

- [6] M. I. Mínguez, A. Pérez y D. Hornero-Méndez. *Pigmentos carotenoides en frutas y vegetales: mucho más que simples "colorantes" naturales*. Departamento de Pigmentos. Alimentos. Departamento de Biotecnología. Instituto de la Grasa (CSIC), pp. 2-7.
- [7] M. E. Carranco, M. C. Calvo, y F. Pérez-Gil, "Carotenoides y su función antioxidante: revisión". *Archivo Latinoamericano de Nutrición*, vol. 61, no. 3, pp. 1-8, 2011.
- [8] K. N. Waliszewski y G. Blasco, *Propiedades nutraceuticas del licopeno*. Salud publica de México, vol. 52, no. 3, pp. 254-265, 2010.
- [9] CIAD y C. Hernández, "Tomate mexicano, fuente de betacaroteno y licopeno," Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), 2016. [Online]. Available: <https://www.ciad.mx/notas/1640-tomate-mexicano-fuente-de-betacaroteno-y-licopeno.html>.
- [10] L. Guevara y D. Alvarado, "Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)," *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 18, no. 1, pp. 51-66, 2014.
- [11] D. H. Covarrubias, C. F. Pomares, G. E. A. Abreu, M. Á. D. Ortiz, y M. E. H. Aguilar, "El licopeno y su papel en la prevención del cáncer de próstata. Centro de Investigaciones Cerebrales. Universidad Veracruzana, 2018. [Online]. Available: <https://www.uv.mx/eneurobiologia/vols/2013/8/Herrera/HTML.html#>.
- [12] R. M. C. Bojórquez, J. G. Gallego y P. S. Collado, "Propiedades funcionales y beneficios para la salud del licopeno," *Nutrición Hospitalaria*, vol. 28, no. 1, pp. 6-15, 2013.
- [13] Universia México, "4 enfermedades que puedes combatir con el tomate," Universia México, 2013. [Online]. Available: <https://noticias.universia.net.mx/en-portada/noticia/2013/10/15/1056239/4-enfermedades-puedes-combatir-tomate.html>
- [14] M.G. Candelas, A. Guzmán, "Extracción y cuantificación por HPLC de licopeno en tomate y polvo de tomate Candelas," vol. 94, pp. 236-244.
- [15] A. I. O. Barba, M. C. Hurtado, M. C. S. Mata, V. F. Ruiz, y M. L. S. de Tejada, "Application of a UV-vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and -carotene in vegetables," *Food Chemistry*, vol. 95, no. 2, pp. 328-336, Mar. 2006.
- [16] A. Valenzuela, C. Yáñez y C. Golusda, "El ostión del norte chileno (*Argopecten Purpuratus*). Un alimento de alto valor nutricional". *Revista chilena*, vol. 38, no. 4, pp. 148-155, 2011.
- [17] C. Bueno-solano, O. N. Campas-baypoli, A. S. Díaz-garcía, E. I. Izaguirre-flores, W. Verdugo-zamorano y M. I. Estrada-alvarado, "Quantification of riboflavin (vitamin b2) in dairy products by hplc," vol. 36, no. 5, pp. 136-142, 2009.
- [18] C. O. Olaiya y A. A. Adigun, "Chemical manipulation of tomato growth and associated biochemical implications on flavonoid, lycopene and mineral contents," *African Journal of Plant Science*, vol. 4, no. June, pp. 167-171, 2010.
- [19] A. Darrigues, J. Hall, E. Van Der Knaap, D. M. Francis, N. Dujmovic, y S. Gray, "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, 2008.
- [20] R. Arias, T. Lee, L. Logendra y H. Janes, "Correlation of Lycopene Measured by HPLC with the L*, a*, b* Color Readings of a Hydroponic Tomato and the Relationship of Maturity with Color and Lycopene Content," *Journal Agricultural and Food Chemistry*, pp. 1697-1702, 2000.
- [21] O. A. Zamudio, "Procesamiento de imágenes implementado en FPGA para estimar licopeno y b-caroteno en tomate rojo y zanahoria." Querétaro, México, p. 104, 2015.
- [22] H. Ibayashi, Y. Kaneda, J. Imahara, N. Oishi, M. Kuroda y H. Mineno, "A reliable wireless control system for tomato hydroponics," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 5, 2016.
- [23] B. Li, J. Lecourt y G. Bishop, "Advances in Non-Destructive Early Assessment of Fruit Ripeness towards Defining Optimal



Time of Harvest and Yield Prediction— A Review”, *Plants*, no. January, 2018.

[24] A. Gastélum-Barrios, “Sistema basado en análisis de imágenes implementado en FPGA para estimar el grado de madurez y contenido de licopeno en tomate rojo.” p. 90, 2012.

[25] D. Wu and D. W. Sun, “Colour measurements by computer vision for food quality control—A review,” *Trends Food Science and Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 5-20, 2013.

[26] L. Molina, “Modo de color Lab,” Marzo 2010. [Online]. Available: <https://sobrecolors.blogspot.mx/2010/03/modo-de-color-lab.html>

[27] A. I. Negueruela, A. Ferrer, S. Remo y R. Oria, “Changes during the ripening of the very late season Spanish peach cultivar Calanda Feasibility of using CIELAB coordinates as maturity indices,” *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 105, pp. 435-446, 2005.

[28] M. A. Vazquez-Cruz et al., “Application of neural networks to estimate carotenoid content during ripening in tomato fruits (*Solanum lycopersicum*),” *Scientia Horticulturae (Amsterdam)*, vol. 162, pp. 165-171, 2013.

[29] E. Mercado-silva y P. Benito-bautista, “Fruit development, harvest index and ripening changes of guavas produced in central Mexico,” *Postharvest Biology and Technology*, vol. 13, pp. 143-150, 1998.

[30] C. A. Padrón Pereira, G. M. Padrón León, A. I. Montes y R. A. Oropeza, “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, 2012.

[31] MINOLTA, “CR-400 Chroma Meter” [Online]. Available: <https://sensing.konicaminolta.us/products/cr-400-chroma-meter-colorimeter/>

[32] S. Saranwong y S. Kawano, “Improvement of PLS calibration for Brix value and dry matter of mango using information from MLR calibration. *Postharvest Biology and Technology*, vol. 295, pp. 287-295, 2001.

[33] A. G. Saad, P. Jaiswal y S. N. Jha, “Non-destructive quality evaluation of intact tomato using VIS-NIR spectroscopy,” *Journal of Advanced Research*, vol. 2, no. 12, pp. 632-639, 2014.

[34] P. Becerra, M. Tutor y C. P. Due, “Control del carril lineal y calibración de una cámara CCD en la adquisición 3D de piezas industriales,” p. 114, 2005.

[35] C. Guide and P. Videographers, “CCD and CMOS Image Sensors,” [Online]. Available: <https://sony.com/professional>

[36] M. Zaborowicz, P. Boniecki, K. Koszela, A. Przybylak y J. Przybył, “Application of neural image analysis in evaluating the quality of greenhouse tomatoes,” *Scientia Horticulturae (Amsterdam)*, vol. 218, pp. 222-229, 2017.

[37] N. Goel y P. Sehgal, “Fuzzy classification of pre-harvest tomatoes for ripeness estimation – An approach based on automatic rule learning using decision tree. *Applied Soft Computing*, vol. 36, pp. 45-56, 2015.

[38] M. Dadwal y V. K. Banga, “Color Image Segmentation for Fruit Ripeness Detection: A Review,” *ICEECE'2012*, pp. 190-193, 2012.

[39] G. Niño-Medina, J. C. Rivera-Castro, J. A. Vidales-Contreras, H. Rodríguez-Fuentes y A. I. Luna-Maldonado, “PhysicoChemical Parameters for Obtaining Prediction Models in the Postharvest Quality of Tomatoes (*Solanum Lycopersicum* L.),” *Mda*, vol. 6, no. 2, pp. 54-66, 2013.

[40] S. Taghadomi-Saberi, M. Omid, Z. Emam-Djomeh y K. H. Faraji-Mahyari, “Determination of cherry color parameters during ripening by artificial neural network assisted image processing technique,” *Journal of Agricultural Science Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 589-600, 2015.

[41] K. Raut y V. Bora, “Assessment of Fruit Maturity using Digital Image Processing,” *International Journal Science Technology and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 273-279, 2016.

[42] A. N. Khairi, M. A. F. Falah, A. Suyantohadi, N. Takahashi y H. Nishina, “Effect of Storage Temperatures on Color of Tomato

Fruit (*Solanum Lycopersicum* Mill.) Cultivated under Moderate Water Stress Treatment," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 3, pp. 178-183, 2015.

[43] F. Mendoza y J. M. Aguilera, "Application of Image Analysis for Classification of Ripening Bananas," *Journal of Food Science*, vol. 69, no. 9, pp. 471-477, 2004.

[44] A. Al-mallahi, T. Kataoka, H. Okamoto y Y. Shibata, "An image processing algorithm for detecting in-line potato tubers without singulation," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 70, pp. 239-244, 2010.

[45] X. Liming y Z. Yanchao, "Automated strawberry grading system based on image processing," *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 32-39, 2010.

[46] R. G. Raul, T. P. Irineo, R. G. Guevara-González y C. M. L. Miguel, "Biosensors Used for Quantification of Nitrates in Plants," *Journal Sensors*, vol. 2016, 2016.

[47] C. Acosta, G. Sampallo, A. G. y M. Cleva, "Detección e identificación de defectos en granos de arroz empleando visión artificial," *CAI*, pp. 98-111.

[48] M. Makky, "A Portable Low-cost Non-destructive Ripeness Inspection for Oil Palm FFB," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 9, pp. 230-240, 2016.

[49] A. Saad, A. Ibrahim y N. El-Biale, "Internal quality assessment of tomato fruits using image color analysis," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal...*, vol. 18, no. 1, pp. 339-352, 2016.

[50] I. Maya, "Remote Monitoring of Agricultural Robot Using Web Application," *IFAC Procedia*, vol. 4, no. 1, pp. 138-142, 2013.

[51] Y. Zhao, L. Gong, B. Zhou, Y. Huang y C. Liu, "Detecting tomatoes in greenhouse scenes by combining AdaBoost classifier and colour analysis," *Biosystem Engineering*, vol. 148, no. 2009, pp. 127-137, 2016.

[52] Y. Zhao, L. Gong, Y. Huang y C. Liu, "Robust tomato recognition for robotic harvesting using feature images fusion," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 2, 2016.

[53] G. Molinero Díez, "Segmentación de imágenes en color basada en el crecimiento de regiones," *ETSI*, no. *Ingeniería de telecomunicación*, pp. 5-10, 2010.

[54] M. Makky y P. Soni, "In situ quality assessment of intact oil palm fresh fruit bunches using rapid portable non-contact and non-destructive approach," *Journal Food Engineering*, vol. 120, no. 1, pp. 248-259, 2014.

[55] S. Tilahun et al., "Prediction of lycopene and β -carotene in tomatoes by portable chroma-meter and VIS/NIR spectra," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 136, pp. 50-56, Feb. 2018.

[56] J. Trebolazabala, M. Maguregui, H. Morillas, A. de Diego y J. M. Madariaga, "Portable Raman spectroscopy for an in-situ monitoring the ripening of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruits," *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 180, pp. 138-143, 2017.

[57] A. Radzevičius, J. Viškėlis, R. Karklelienė, D. Juškevičienė y P. Viškėlis "Determination of tomato quality attributes using near infrared spectroscopy and reference analysis," *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 103, no. 1, pp. 443-448, 2016.

[58] N. Hagen, M. W. Kudenov y N. Hagen, "Review of snapshot spectral imaging technologies Review of snapshot spectral imaging technologies," *Optical Engineering*, SPIE, 2018.

[59] L. Muhua, F. Peng, y C. Renfa, "Non destructive estimation peach SSC and firmness by multispectral reflectance imaging," *New Zealand Journal of Agricultural Research*, vol. 8233, 2010.

[60] C. Liu, W. Liu, W. Chen, J. Yang y L. Zheng, "Feasibility in multispectral imaging for predicting the content of bioactive compounds in intact tomato fruit," *Food and Chemistry*, vol. 173, pp. 482-488, 2015.

[61] I. Urbano, R. Vasconcelos, M. Azzolini, A. Pedro, y E. Caruso, "Chlorophyll fluorescence as a tool to evaluate the ripening of 'Golden' papaya fruit," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 33, pp. 163-173, 2004.



[62] M. H. M. Hazir, A. R. M. Shariff, M. D. Amiruddin, A. R. Ramli y M. Iqbal Saripan, "Oil palm bunch ripeness classification using fluorescence technique," *Journal Food and Engineering*, vol. 113, no. 4, pp. 534-540, 2012.

[63] A. M. Hoffmann, G. Noga y M. Hunsche, "Fluorescence indices for monitoring the ripening of tomatoes in pre- and postharvest phases," *Scientia Horticulturae (Amsterdam)*, vol. 191, pp. 74-81, 2015.

[64] C.M. Durán-Acevedo, O.E. Manuel-Gualdron y M. Hernández-Ordoñez, "Nariz electrónica para determinar el índice de madurez del tomate de árbol (*Cyphomandra Betacea* Sendt) Electronic Nose to Determine the Maturity Index of the Tree Tomato," *FI-UNAM*, no. 3, pp. 351-362, 2014.