

UNIVERSIDAD NACIONAL 99
"TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA"
DE AMAZONAS



11 3 DIC 2012

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

ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE
COLOR, pH, CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES Y
PORCENTAJE DE ACIDEZ DEL TOMATE (*Lycopersicon esculentum*)

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PRESENTADO POR:

Bach. MIRIAM ROSSLEDY GOÑAS SALAZAR

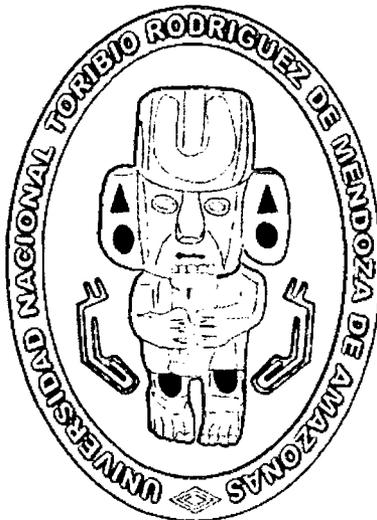
ASESOR:

Ing. WILSON MANUEL CASTRO SILUPU

CHACHAPOYAS - PERÚ

2 0 1 2

**UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE
MENDOZA DE AMAZONAS
FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL**



18 DIC 2012

Tesis para optar al Título Profesional

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Título

**ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE
COLOR, pH, CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS SOLUBLES TOTALES Y
PORCENTAJE DE ACIDEZ DEL TOMATE (*Lycopersicum esculentum*)**

Autor

Bach. Miriam Rossledy Goñas Salazar

Asesor

Ing. Wilson Manuel Castro Silupu

Chachapoyas - 2012

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo en primer lugar a Dios, fuerza impulsora de todos mis actos y reposo en tiempos agitados.

A mis padres Wilmer y Judith, por brindarme la vida e inculcarme la necesidad de tratar de ser cada día una mejor persona. A mi esposo Luis e hijos Aylin y Matias, los más bellos regalos que esta vida me ha deparado.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, por apoyarme en cada paso de mi formación profesional.

A mi asesor, por su guía continua en el transcurso de la presente tesis A todos mis amigos y amigas que con sus palabras me dieron el aliento necesario para no desmayar por difícil que el camino se presentase.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Ph. D. Dr. Hab. Vicente Marino Castaneda Chavez
Rector

Dr. Roberto José Nervi Chacón
Vicerrector Académico

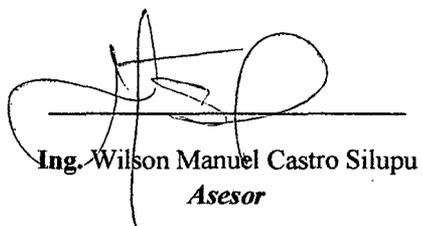
Dr. Ever Salome Lázaro Bazán
Vicerrector Administrativo

Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias

VISTO BUENO DEL ASESOR

Yo, Ing. Wilson Manuel CASTRO SILUPU, identificado con DNI N° 40322327, con domicilio legal en el Jr. Los Ángeles N 540, Docente a Dedicación Exclusiva de la facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, asesor de la tesis titulada “Estudio de la relación entre los parámetros de color, ph, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez del tomate (*lycopersicum esculentum*)” presentado por la Bach. Mirian Rossledy Goñaz Salazar, egresada de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial.

Por lo indicado doy testimonio y visto bueno, que la Bach. Mirian Rossledy Goñaz Salazar, ha ejecutado la tesis mencionada, por lo que en fe a la verdad firmo la presente.



Ing. Wilson Manuel Castro Silupu
Asesor

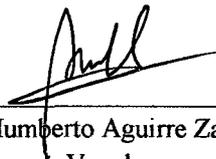
**LA PRESENTE TESIS HA SIDO APROBADA POR EL PRESENTE
JURADO**



Ms.C. Armstrong Barnard Fernandez Jeri
Presidente



Ing. Efraín Manuelto Castro Alayo
Secretario



Ing. Helí Humberto Aguirre Zaquinaula
Vocal

COPIA DEL ACTA DE SUSTENTACIÓN



UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS

FACULTAD DE Ingeniería y Ciencias Agrarias

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Chachapoyas, el día 03 de diciembre del año 2012, siendo las 10:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado conformado por:

Presidente: Dug. M.C. Aristhony Bernard Fernandez Jen'

Secretario: Dug. Ezequiel Manuelito Castro Mayo

Vocal: Dug. Abel Anuberto Aguirre Requena

para evaluar la Sustentación del Informe de Tesis presentado por el(la) bachiller, don(ña) Miriam Rossledy Bonas Salazar

titulado Estudio de la relación entre los parámetros de color, pH, concentración de sólidos disueltos totales y porcentaje de acidez del tomate (Lycopersicon esculentum)

Después de la sustentación respectiva, el Jurado acuerda la APROBACIÓN (X), DESAPROBACIÓN () por mayoría (), por unanimidad (X); en consecuencia, el (la) aspirante puede proseguir con el trámite subsiguiente, de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la UNAT-A.

Siendo las 11:30 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación del Informe de Tesis.

SECRETARIO [Signature] PRESIDENTE [Signature]

VOCAL [Signature]



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Resumen	5
Abstract	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	10
2.1. Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	10
2.2. Conceptos previos al análisis del color	14
2.3. Representación del color	15
2.4. Visión artificial	16
2.5. Adquisición y procesamiento de imágenes	17
2.6. Uso de Matlab en el análisis de imágenes	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1. Lugar de ejecución	21
3.2. Materia prima	21
3.3. Material de vidrio	21
3.4. Reactivos	21
3.5. Equipos	22
3.6. Otros	22
3.7. Métodos	22
4. RESULTADOS	29
5. DISCUSIÓN	36
6. CONCLUSIONES	39
7. RECOMENDACIONES	39
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	40
ANEXOS	44

Índice de figuras

	Pág.
Figura 1. Carta de colores del tomate del Dutch Central Bureau for Horticultural Auctions (Holanda).	13
Figura 2. Carta de colores del tomate de Difrusa Export S.A. (Cartagena, Murcia, España).	14
Figura 3. Representación tridimensional del color en una imagen.....	15
Figura 4. Modelo del espacio color de CIELab.....	16
Figura 5. Esquema del proceso generalizado de análisis de imágenes.....	17
Figura 6. Imagen de tejido de manzana.....	18
Figura 7. Esquema generalizado de sistema de visión Computacional.....	19
Figura 8. Relación entre el color de la corteza y el estado de madurez.....	23
Figura 9. Equipo de adquisición de imágenes.....	24
Figura 10. Incidencia de los haces de luz en la muestra.....	25
Figura 11. Representación matricial de imagen en formato *.JPG.....	26
Figura 12. Resultado de la aplicación del algoritmo de segmentación.....	26
Figura 13. Resultados de la aplicación de función L, a*, b*.....	27
Figura 14. Evolución de parámetros a* y b* en cuatro estadios de madurez.....	30
Figura 15. Evolución de parámetros fisicoquímicos evaluados en cuatro estadios de madurez.....	32
Figura 16. Modelo de la acidez vs a*.....	35
Figura 17. Reprocesamiento y segmentación de imágenes.....	44
Figura 18. Algoritmo utilizado para el análisis de la imagen.....	45

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1. Composición nutricional del tomate.....	11
Tabla 2. Parámetros de color de las muestras analizadas	29
Tabla 3. Mínimos, máximos y deltas de los parámetros de color de las muestras analizadas.....	29
Tabla 4. Ejemplos de parámetros de color en cuatro muestras analizadas.....	30
Tabla 5. pH, °Brix y porcentaje de acidez de las muestras analizadas	31
Tabla 6. Mínimos, máximos y deltas de los parámetros fisicoquímicos evaluados en las muestras analizadas	31
Tabla 7. Ejemplos de los parámetros fisicoquímicos evaluados en cuatro muestras analizadas.....	32
Tabla 8. Ecuaciones y estadísticos de las relaciones analizadas	33
Tabla 9. Análisis de regresión múltiple.....	34
Tabla 10. Análisis de varianza.....	34

Índice de Fotografías

	Pág.
Fotografía 1. Tesista en los ambientes del Laboratorio de Ingeniería de la UNTRM....	46
Fotografía 2. Equipo nutilizado para la adquisición de imágenes y determinación de parámetros de color	46
Fotografía 3. Colocación de muestras para adquisición de imagenes	47
Fotografía 4. Preparación de muestras para análisis fisicoquímicos	48
Fotografía 5.Desarrollo de pruebas fisicoquímicas	49

Resumen

La presente tesis tuvo como objetivo el estudiar la relación existente entre los parámetros de color y el pH, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez del tomate (*Lycopersicum esculentum*); para lograr este objetivo se utilizó un sistema de visión artificial. Las muestras fueron adquiridas en un mercado local, se procedió al análisis de imágenes para obtener los parámetros de color en el espacio CIELa*b*; posteriormente se realizó el análisis fisicoquímico según los métodos oficiales de la AOAC y cálculo de regresiones múltiples tomando como variables independientes a los parámetros de color y como variables dependientes a los parámetros fisicoquímicos. Finalmente se estudio la relación de los parámetros de color y los de color mediante la determinación de las regresiones múltiples para cada uno de los parámetros fisicoquímicos (como variable dependiente) y los parámetros de color y (como variables independientes); obteniéndose las siguientes ecuaciones:

- Acidez (%) = $0.00099(L) - 0.00161(a) + 0.00101(b) + 0.10833$ ($R^2 = 0.732$).
- Sólidos solubles totales (°Brix) = $0.0098(L) + 0.0132(a^*) - 0.02390(b^*) + 4.3488$ ($R^2 = 0.203$)
- pH (Unid) = $0.0025(L) + 0.0014(a^*) - 0.0015(b^*) + 4.75884$ ($R^2 = 0.516$)

A partir de los valores de R^2 se concluye que el único parámetro fisicoquímico capaz de ser relacionado con los parámetros de color es la acidez; asimismo, del análisis de varianza se concluye que el parámetro de color de mayor relevancia en la ecuación obtenida es a^* .

Palabras clave: Análisis de imágenes, CIELa*b*, visión artificial

Abstract

The present work was carry out to study the relationship between color parameters and pH, total soluble solids concentration and percentage of acidity of the tomato (*Lycopersicon esculentum*) to achieve this goal was used an artificial vision system. The samples were acquired in a local market, next an image analysis was made to obtain color parameters and represented in CIELa*b* space, then the physicochemical analysis was performed according to the AOAC official methods. Then was calculated multiple regressions taking as variables independent color parameters as dependent variables the physicochemical parameters. Finally was studied the relationship of color parameters and color by determining multiple regressions, for each of the physicochemical parameters (dependent variable) and color parameters (independent variables), obtaining the following equations:

- Acidity (%) = 0.00099 (L) - 0.00161(a) + 0.00101 (b) + 0.10833 (R2 = 0.732).

- Total soluble solids (° Brix) = 0.0098 (L) + 0.0132 (a *) - 0.02390 (b *) + 4.3488 (R2 = 0.203)

- pH (Units) = 0.0025 (L) + 0.0014 (a *) - 0.0015 (b *) + 4.75884 (R2 = 0.516)

From the values of R² was concluded that the only physicochemical parameter that can be related to the color parameters is acidity; also applying analysis of variance it's concluded that the color parameter most important in the equation, previously discussed, is a* .

Keywords: Image analysis, CIELa*b*, artificial vision

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de modelos computacionales es y ha sido, desde hace algún tiempo, un área de estudio emergente en diversos campos de la actividad humana; esto debido en gran parte a sus posibilidades aplicación en la Ingeniería, Meteorología, Simulación de experimentos de laboratorio, sin reemplazar estos, y posibilitando la experimentación, predicción y aprendizaje, respondiendo a preguntas como: ¿Y si...? (Sandeep, 2001).

Estas simulaciones, usan modelos o representaciones más o menos simplificadas de los sistemas en estudio (Ruiz, 2006); estos "modelos" se definen como una "representación o descripción de un fenómeno utilizando una colección sistemática de ecuaciones empíricas / teóricas" (Dobre y Sánchez, 2007). En este sentido, el modelado de un fenómeno y su utilización en un sistema computacional para simular los cambios que se producen al variar alguna de las condiciones del proceso o del entorno, se encuentran íntimamente ligados. Con esto se cumple uno de los objetivos principales del estudio y simulación de sistemas biológicos (Abdullah, 2000).

Algunas de las propiedades de mayor interés, actualmente, para el desarrollo de modelos son las propiedades sensoriales de los productos alimenticios, debido en gran parte a la susceptibilidad de los resultados al cambio del operador o evaluador. Parámetros como el aspecto y el color de la superficie, son los primeros parámetros de evaluación que el consumidor evalúa para tomar la decisión de aceptación o rechazo, aún antes de que este sea ingerido (Pedreschi, 2006, Cheng, 2004). Esto es debido a su estrecha correlación entre los parámetros visuales y el estado de madurez de productos alimenticios, especialmente vegetales.

En este sentido, tal como mencionan Artés-Calero y Artés-Hernández (2003) los órganos vegetales están constituidos por tejidos vivos que evolucionan tras su recolección con pérdida de agua y firmeza, color verde, acidez, astringencia y aumento de azúcares, sólidos solubles y aromas. Por tanto, es posible relacionar parámetros fácilmente observables como el color con parámetros de mayor dificultad de evaluación como contenidos de acidez, azúcares, etc. Sin embargo, al no contar con parámetros de color cuantificables estas relaciones pierden su reproducibilidad y aplicabilidad en escenarios de clasificación de productos alimenticios a escalas industriales.

Surge en este escenario la visión artificial, la cual cuenta entre sus potencialidades la capacidad de adquirir y analizar imágenes, obteniendo información aplicable en las decisiones de control de procesos. Según Cheng (2004) este análisis de imágenes se relaciona con la segmentación, cuantificación del color y clasificación de elementos de interés dentro de las imágenes. En este sentido, la utilización de visión computacional, como medio para estimar los cambios de las características de color en alimentos, es sumamente ventajosa al remplazar las respuestas de los panelistas por imágenes tomadas a partir de una cámara de video y procesadas mediante algoritmos computacionales, ello disminuirá costo, tiempo y subjetividad de las medidas de color haciéndolas más contables y por lo tanto estimando los cambios de color de forma científica (Brosnan y Sun, 2004)

En base⁷ a ello y acercando esta situación problemática a nuestra realidad, enfocamos esta investigación en estimar y analizar mediante visión computacional los cambios de las características de color del tomate (*Lycopersicon esculentum*) en diferentes estados de madurez y relacionarlos con los valores de pH, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez. Para lo cual se planteó el siguiente problema de investigación:

*¿Existe relación significativa entre los parámetros de color, pH, contenido de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez del tomate (*Lycopersicum esculentum*)?*

Teniendo como objetivo general

*Determinar la relación que existe entre los parámetros de color y el pH, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez del tomate (*Lycopersicum esculentum*).*

Para lo cual se cumplió con los siguientes objetivos específicos

- a) Determinar parámetros de color en diferentes estados de madurez del tomate (*Lycopersicum esculentum*), utilizando un sistema de visión por computadora.
- b) Determinar pH, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez en diferentes estados de madurez del tomate (*Lycopersicum esculentum*)
- c) Relacionar el pH, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez con parámetros de datos de color del tomate (*Lycopersicum esculentum*)

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Tomate (*Lycopersicum esculentum*)

A continuación se presentan las principales características del tomate (*Lycopersicum esculentum*), extraídos de FAO¹ (2006).

Botánica: Es una hortaliza perteneciente a la familia de las Solanáceas, constituida por un tallo principal largo con ramificaciones. Posee hojas alternas de 15 a 45 cm de longitud. Los tallos y las hojas son de colores verdes y ásperos al tacto, expelen un olor característico. Las flores son de color amarillo y se agrupan en racimos de tres a siete de ellas, en cimas insertadas en el tallo principal. Se propaga por semillas. Por tener un tallo poco rígido, se tiene que sembrar como enredadera con un tutor. La densidad promedio es de 15000 plantas a 20000 plantas por hectárea. La cosecha se inicia entre 90 y 120 días después de la siembra. Crece en lugares calientes y frescos (20°C y 23°C) y una intensidad luminosa alta. Se siembra preferiblemente en suelos profundos con buen drenaje y ligeramente ácidos.

Descripción: el fruto es una baya de pulpa tierna predominantemente alcalina debido a su contenido mineral. Es de color rojo, rosado, amarillo o verde (rojo más común) y de forma redonda, achatada o alargada. Presenta varios tamaños dependiendo de su variedad.

Origen y Localización: originaria de la zona ecuatorial del Perú. Se difundió por todo el mundo siendo en la actualidad una de las hortalizas de mayor consumo.

Composición nutricional: En la siguiente tabla se muestra la composición nutricional del tomate por cada 100 gramos de la parte comestible.

¹ Food and Agricultural Organization

Tabla 1. Composición nutricional del tomate

Compuesto	Unidad	Cantidad
Agua	g	94.3
Carbohidratos	g	3.3
Grasas	g	0.1
Proteínas	g	0.9
Fibra	g	0.8
Cenizas	g	0.6
Sodio	mg	9
Calcio	mg	7
Fósforo	mg	19
Hierro	mg	0.7
Vitamina A	UI	1100
Tiamina	mg	0.05
Riboflavina	mg	0.02
Niacina	mg	0.6
Ácido ascórbico	mg	20

Fuente: FAO (2006)

Usos:

Fruto fresco: se consume como fruto crudo entero o combinado en ensaladas. Se utiliza para la preparación de jugos, guisos, aderezos para carnes, pescados, pizzas y otros.

Fruto procesado: se utiliza en la preparación de jugos, tomate concentrado en pastas o purés, tomate pelado en conserva, tomate deshidratado y salsa de tomate entre otros.

Medicinal: ayuda a neutralizar la excesiva acidez estomacal. Es beneficiosa para aumentar el metabolismo celular. Provee elementos nutritivos desintoxicantes que favorecen la revitalización de las arterias.

Cambios durante la maduración del tomate

El tomate es un fruto carotenogénico, con una síntesis masiva de carotenoides durante su maduración, habitualmente acompañada por un cambio en su perfil de carotenoides. En los cromoplastos, los carotenoides habitualmente se acumulan en estructuras lipídicas, aunque en el tomate se han encontrado también cristales de

carotenoides, principalmente carotenos, inmersos en el espacio estromático. El color rojo del tomate resulta del reemplazo de las clorofilas degradadas por los pigmentos carotenoides, con aumento de licopeno, su caroteno específico y más abundante (con frecuencia de 4 a 7 mg/100 g) en las variedades rojas, anaranjadas y amarillas, y de xantofilas, cuando los cloroplastos se convierten en cromoplastos. Inicialmente se sintetiza fitoeno (incoloro), para posteriormente convertirse en ζ -caroteno (amarillo pálido), β -caroteno (anaranjado) y xantofila (amarilla). La síntesis de pigmentos amarillentos precede a la de los rojizos (licopeno y β -caroteno), pero la masiva acumulación de éstos termina enmascarando a aquellos. Pero si la maduración sucede a temperaturas inferiores a 12 °C, sub óptimas para la síntesis de licopeno, en los cromoplastos se acumula β -caroteno, cuya síntesis progresa a esas temperaturas, dando lugar a frutos anaranjados o amarillentos (Artés-Calero y Artés-Hernández, 2003).

Aunque el tomate sigue madurando después de recolectado, solo alcanza su calidad óptima para el consumo cuando madura unido a la planta madre. El estado de madurez en la recolección es seguramente el factor más determinante de su vida comercial y calidad de consumo. Los frutos recolectados verdes, cuando maduran tras la recolección son más sensibles a la deshidratación, marchitamiento y daños mecánicos y de inferior calidad y con menor valor nutritivo (vitamina C) que los recolectados plenamente maduros. Por su parte los frutos recolectados maduros son menos sensibles a los daños por el frío que los inmaduros, aunque se ablandan más fácilmente y suelen ser más insípidos (Kader, 1993).

Evaluación del estado de madurez basado en el color

El color de la epidermis es un buen indicador del estado de madurez del tomate y de la mayoría de productos hortícolas. Existen cartas de colores para dar objetividad a

los valores de este atributo que, ligado el calibre, suelen constituir índices de madurez y de calidad específicos de los importadores, cadenas comerciales, y/o de los exportadores. Así, en EEUU se emplea la del California Tomato Board desde 1975, que establece seis categorías referidas exclusivamente al color de la epidermis, mientras en Europa está muy extendida la holandesa Kleur-Stadia Tomaten del Dutch Central Bureau for Horticultural Auctions (Figura 1), la de la empresa Sainsbury en Inglaterra y para los suministradores de esta cadena, y en España la de Difrusa Export S.A. Cantwell y Kasmire (2002) han descrito la apariencia interna del tomate considerando el estado de las semillas y del tejido placentario, así como el color interno y externo, para establecer nueve diferentes estados de maduración, desde inmaduro hasta completamente rojo. En EEUU el tomate suele recolectarse para fresco en estado de inicio del envero (pintón inicial o “breaker”), con la primera manifestación de color rosa de la epidermis, mientras en Europa se recolecta habitualmente en un estado algo más avanzado, con el envero desarrollado.

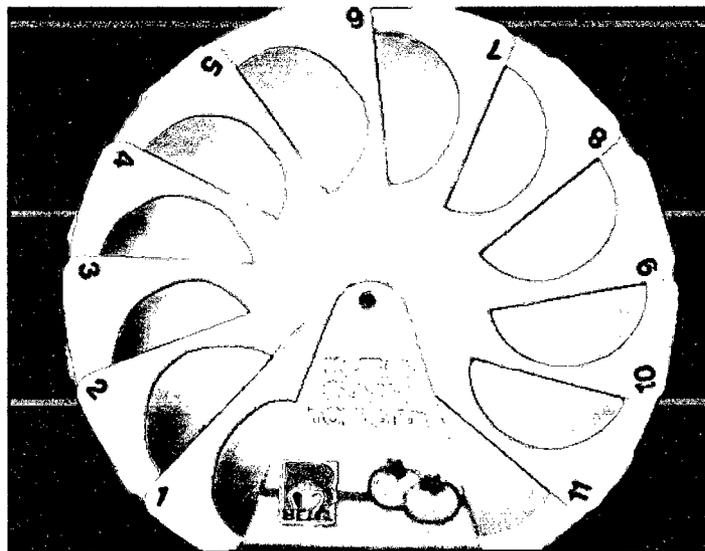


Figura 1. Carta de colores del tomate del Dutch Central Bureau for Horticultural Auctions (Holanda).

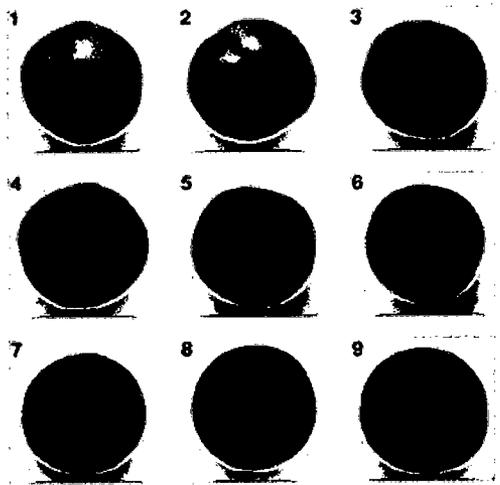


Figura 2. Carta de colores del tomate de Difrusa Export S.A. (Cartagena, Murcia, España).

2.2. Conceptos previos al análisis del color

En las siguientes líneas se exponen los conceptos básicos necesarios para el proceso de análisis del color (Huaman y Saldaña, 2012).

- *Luz* (del latín lux, lucis): onda electromagnética, compuesta por partículas energizadas llamadas fotones, capaz de ser percibida por el ojo humano y cuya frecuencia determina su color.
- *Percepción visual*: una representación mental, visión estereoscópica desarrollada por el hombre a partir de imágenes 2D. Estas imágenes 2D obtenidas en la retina son un conjunto de puntos (aproximadamente un millón de elementos de imagen o píxeles).
- *Color*: una de las mediciones de objetos más importantes para la comprensión de la imagen y descripción del objeto. De acuerdo con la teoría tri-cromática, el color puede ser discriminado por la combinación de tres componentes de color elementales (Rojo, Verde, Azul); siendo así que en nuestra imagen tres valores digitales son asignados a cada píxel de una imagen en color.

2.3. Representación del color

De lo antes mencionado se puede concluir que una imagen es una representación tridimensional del color; es decir que cada pixel de la imagen recibe tres valores y combinados estos presentan el color a percibir por el observador, véase Figura 3.

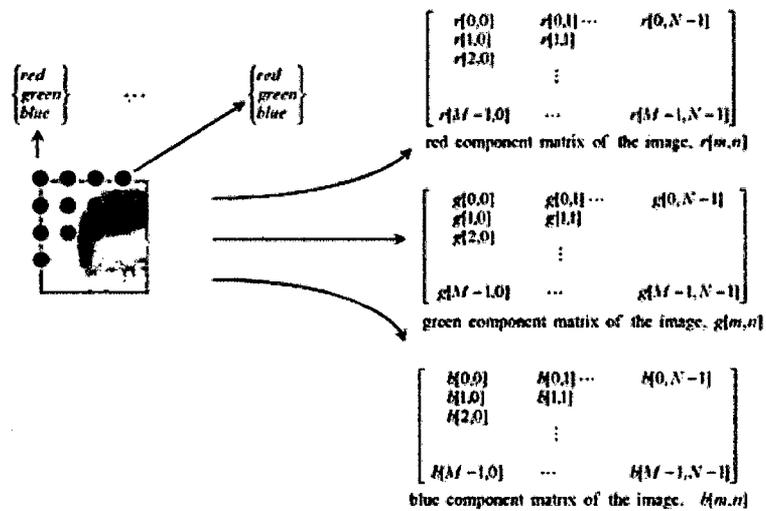


Figura 3. Representación tridimensional del color en una imagen
Fuente: Mohammad (2005)

Se hace entonces necesario el pensar en un espacio en el cual poder representar los parámetros de color en forma de coordenadas; paso previo al análisis de las variaciones de los mismos. Uno de los espacios de color de mayor extensión, por sus aplicaciones a nivel industrial, es el CIELa*b* y en este se centraran los siguientes párrafos.

Espacio CIElab

La necesidad de un espacio de color uniforme, condujo a la transformación de una serie de espacios no lineales CIE XYZ² 1931 que concluyeron en la especificación concreta de una de estas transformaciones en lo que se conoce como espacio de color

² Donde X = Rojo, Y = Verde y Z = Azul

CIE 1976 (L^*, a^*, b^*). El eje L es el de luminosidad y va de 0 (negro) a 100 (blanco). Los otros dos ejes de coordenadas son a^* y b^* , y representan variación entre rojo-verdoso, y amarillento-azulado, respectivamente (Figura 4). Aquellos casos en los que $a^* = b^* = 0$ son acromáticos; por eso el eje L representa la escala acromática de grises que va de blanco al negro. Las proporciones de L^* , a^* y b^* se obtienen de los valores triestímulos de acuerdo con las siguientes transformaciones:

$$L^* = 116[(Y/Y_n)^{1/3} - 16, (Y_n)^{1/3}]$$

$$a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$$

$$b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$$

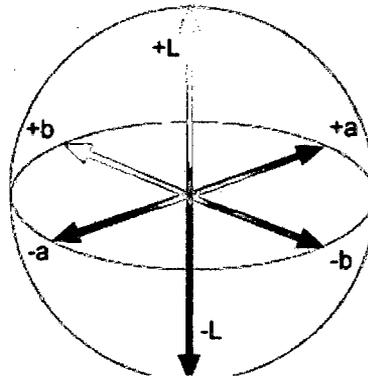


Figura 4. Modelo del espacio color de CIE Lab
Fuente: Westland (2001).

Donde X_n , Y_n , Z_n son los respectivos valores de X , Y y Z con el iluminante que se haya usado para obtener los valores X , Y y Z de la muestra; y los cocientes de X/X_n , Y/Y_n y Z/Z_n son todos superiores a 0.008856 (cuando alguno de ellos es menor a esa cifra, se usa un conjunto de ecuaciones levemente distinto).

2.4. Visión artificial

La visión artificial modela matemáticamente los procesos de percepción visual en los seres vivos, generando programas que permitan simular estas capacidades visuales por computadora. En años recientes esta técnica ha llamado la atención de la ciencia de

alimentos; desarrollándose rápidamente hasta tomar un lugar de privilegio en la inspección de calidad, clasificación y evaluación para un amplio rango de productos, como son los productos de panadería, carnes y pescados, frutos, alimentos listos para consumo, granos, entre otros.

El amplio espectro de aplicaciones, cubierto por la visión por computadora, se debe a que permite extraer y analizar información espectral, espacial y temporal de los distintos objetos (Brosnan, 2004). En la Figura 5, se muestran un esquema generalizado del análisis de imágenes mediante un sistema de visión artificial.

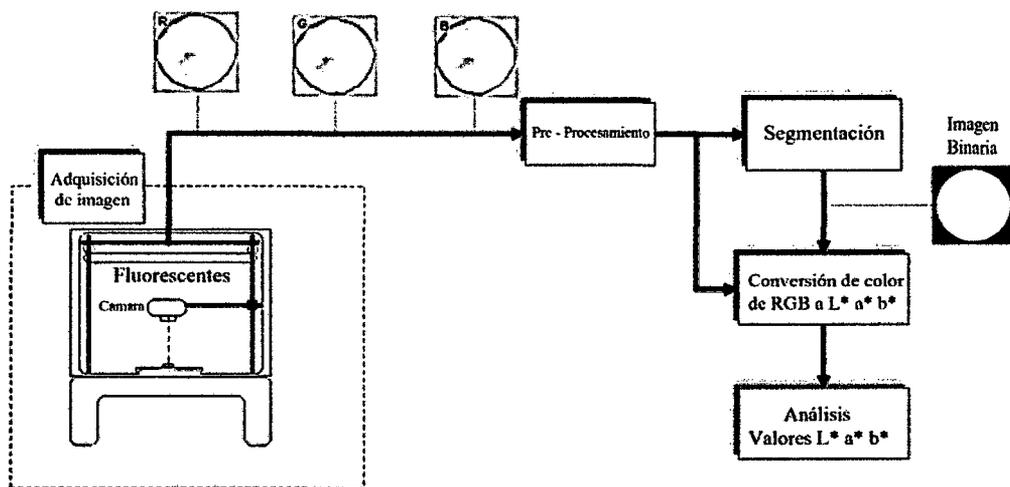


Figura 5. Esquema del proceso generalizado de análisis de imágenes
Fuente: Brosnan (2004).

2.5. Adquisición y procesamiento de imágenes

En los últimos tiempos la forma tradicional de inspección de la calidad viene cambiando bruscamente; debido en gran medida a la llegada de los sistemas de formación de imágenes electrónicas y el rápido descenso en el coste de los ordenadores y otros dispositivos digitales (Cheng y Sun, 2006).

Los sistemas de visión artificial, ideales para la inspección rutinaria y las tareas de control de calidad, se respaldan en sistemas de inteligencia artificial y tecnologías electrónicas (Brosnan, 2004; Pearson, 1996).

Hasta la fecha, la visión computacional ha sido ampliamente aplicado para solucionar diversos problemas de Ingeniería de Alimentos, que van desde simples evaluaciones de calidad de los productos alimenticios hasta complicadas aplicaciones robóticas (Tao et al., 1995; Pearson, 1996; Abdullah et al., 2000).

Las imágenes se forman por la luz incidente en el espectro visible al incidir en una superficie parcialmente reflectante, la superficie de absorción con los fotones dispersos es recogida en la lente de la cámara y se convierte en señales eléctricas, ya sea por tubo de vacío o por cámara CCD³. Sin embargo, en la práctica, esto es sólo una de las muchas formas en que una imagen puede ser generada. En general, hay muchas maneras de formar una imagen algunas de ellas son las siguientes: métodos térmicos, ultrasonidos, rayos X, ondas de radio, etc. véase Figura 6.



Figura 6. Imagen de tejido de manzana
a) adquirida mediante rayos-X y b) simulación computacional
Fuente: Verboven (2011)

³ Un charge-coupled device o CCD (en español «dispositivo de carga acoplada») es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados

La configuración del sistema de visión artificial, véase Figura 7, es relativamente estándar y se compone de:

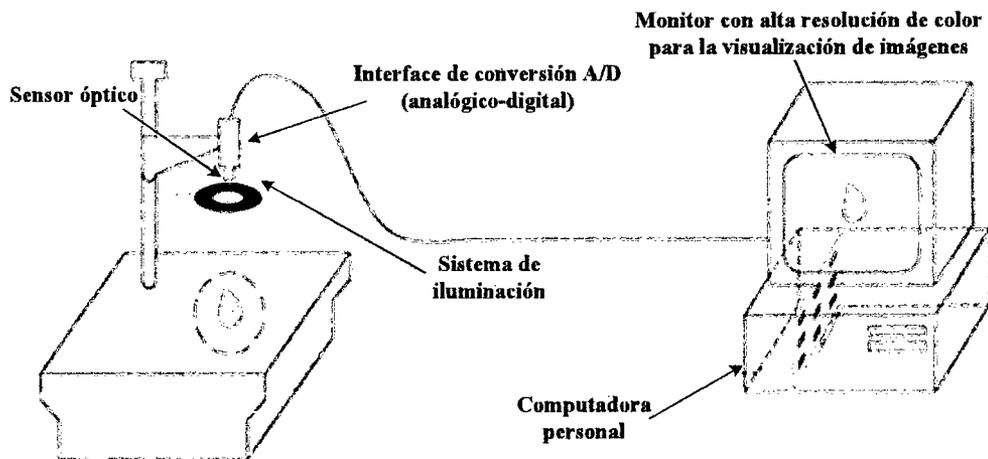


Figura 7. Esquema generalizado de sistema de visión Computacional
Fuente: Adaptado a partir de Du y Sun (2004).

Estos sistemas se han vuelto cada vez más sencillos de utilizar; sin embargo, es necesario se comprendan los objetivos a lograrse y asegurar el equipamiento mínimo necesario que lo permita.

2.6. Uso de Matlab en el análisis de imágenes

Las imágenes al ser en esencia matrices tridimensionales pueden aplicárseles todo tipo de operaciones algebraicas. Dichas operaciones algebraicas, aplicadas de acuerdo a una secuencia lógica a cada elemento de la imagen "pixel", permiten realizar procesos de realce y mejoramiento, segmentaciones, reconocimientos, etc.

En este contexto aparece el software matemático MATLAB⁴ el cual es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X y entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. En la actualidad un gran número de trabajos relacionados con el tratamiento de imágenes tales como los desarrollados por Du y Sun (2004), Verboven (2011) y más recientemente Huaman y Saldaña (2012), entre otros, han utilizado este software para analizar y extraer información a partir de imágenes en alimentos.

⁴ Abreviatura de MATrix LABoratory "laboratorio de matrices"

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Las pruebas experimentales de la presente investigación se desarrollaron en los ambientes del Laboratorio de Ingeniería de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias en la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

La Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas se encuentra emplazada en el Fundo el Franco S/Nº, Barrio de Higos Urco, Distrito de Chachapoyas, Provincia de Chachapoyas, Región Amazonas.

3.2. Materia prima

Muestras de tomate (*Lycopersicum esculentum*), adquiridas en mercados locales.

3.3. Material de vidrio

- Bureta
- Fiola 250 mL.
- Pipetas 1 mL.
- Probetas 100 mL.
- Vasos de precipitación 50, 250, 500 mL.

3.4. Reactivos

- Agua destilada
- Solución de Fenolftaleína
- Solución de Hidróxido de Sodio al 0.05 N

3.5. Equipos

- Computadora Core i5 – 4 GB RAM.
- Equipo de sistema de visión computacional, véase.... De los anexos.
- Memoria USB 4GB.
- pH metro (potenciómetro) e $\pm 0,01$
- Refractómetro

3.6. Otros

- Coladores
- Cuchillos
- Jarras 1 L
- Licuadora
- Pisetas
- Recipientes plásticos

3.7. Métodos

En las siguientes líneas se presenta la metodología utilizada para la obtención del objetivo principal de la presente tesis. Esta metodología se ha dividido de acuerdo a los tres objetivos específicos:

*Determinación de parámetros de color en diferentes estados de madurez del tomate (*Lycopersicum esculentum*);* en este punto se hizo uso de un sistema de visión por computadora desarrollado y aplicado en los trabajos de tesis de López y Loja (2012) y Vargas (2012). A continuación se presentan los detalles de cada uno de los pasos abarcados:

- Recolección de muestras; las muestras utilizadas en la presente investigación fueron adquiridas en el mercado local y se procedió a clasificarlas visualmente, de acuerdo al color de la piel, en verdes, maduras y sazón véase Figura 8.

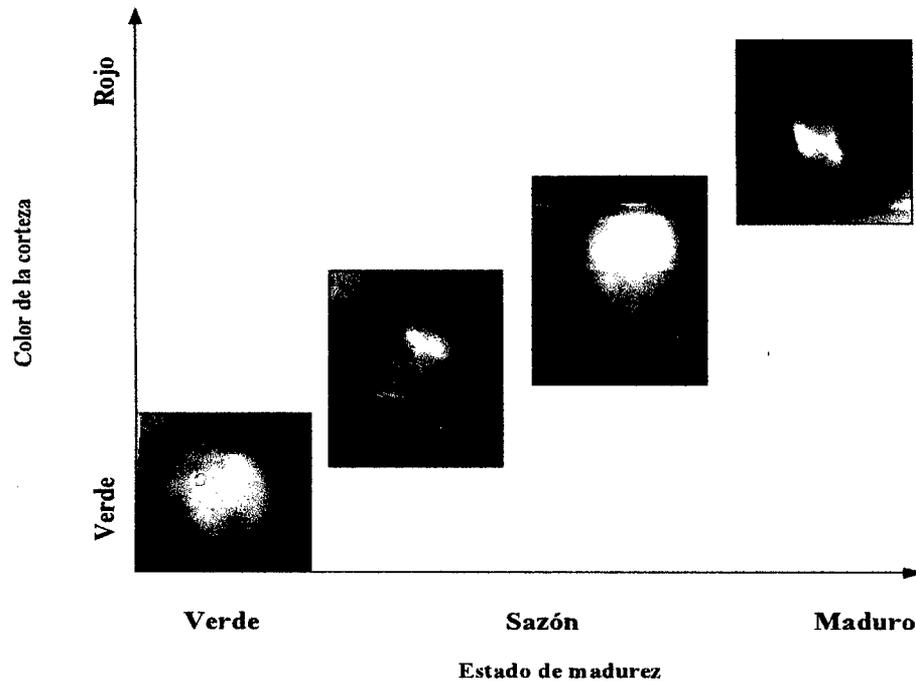


Figura 8. Relación entre el color de la corteza y el estado de madurez

- Preparación de muestras; las muestras fueron lavadas tres minutos frotando estas bajo el agua, desinfectadas, con agua clorada (Solución de Hipoclorito de sodio 50ppm), se guardaron en bolsas plásticas transparentes y se almacenaron a temperatura en el rango de $[0 - 2]$ °C.
- Adquisición de imágenes; las muestras fueron ubicadas en el sistema mostrado en la Figura 9; en este sistema las condiciones de iluminación en la adquisición de las imágenes son estandarizadas mediante cuatro luminarias (Phillips de 16 Watts); proporcionando estas 2300 lumens sobre la muestra, cantidad adecuado para procesos de selección visuales tal según lo recomienda García y Ayuga (1993).

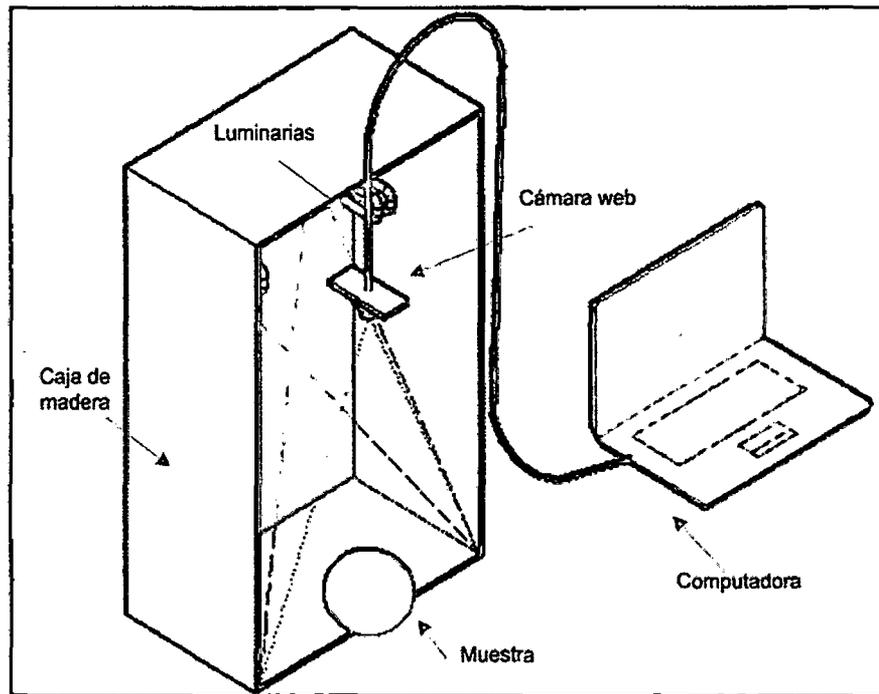


Figura 9. Equipo de adquisición de imágenes

El sistema está constituido por hardware (elementos físicos) y software (elementos informáticos); el hardware se construyó de tal forma que los haces de luz se distribuyan proporcionalmente sobre la superficie de la muestra y los no incidentes sean reflejados, véase Figura 10, razón de pintar la superficie interna de color negro mate. En cuanto al software, este fue modificado a partir del desarrollado por Huamán y Saldaña. (2012), a fin de obtener una adecuada separación de los elementos de interés, paso necesario para proceder a la determinación de los parámetros de color.

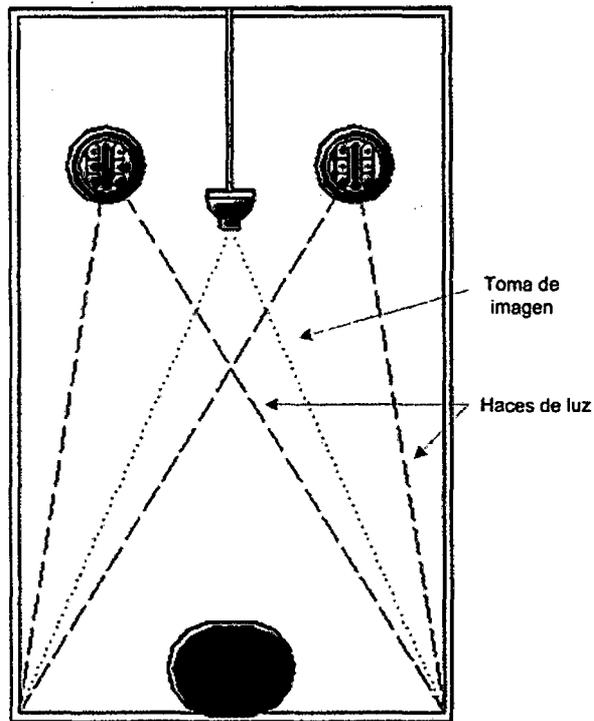


Figura 10. Incidencia de los haces de luz en la muestra

- Determinación de parámetros de color para el desarrollo de esta etapa se utilizó el software proporcionado por Huamán y Saldaña (2012), el cual separa las labores de determinación de los parámetros de color en los siguientes pasos:

- o Pre-procesamiento de imágenes.- las imágenes, en formato *.JPG⁵, son cargadas a la memoria de la computadora, en forma de matriz tridimensional. Matemáticamente esta matriz puede representarse tal como se muestra en la Figura 11.

A partir de esta matriz se aíslan los elementos de interés, imagen del tomate, del fondo determinando que pixeles contienen la información de color y morfología. Esta información es guardada en memoria de operación para su posterior análisis.

⁵ Formato creado por Joint Photograph Group

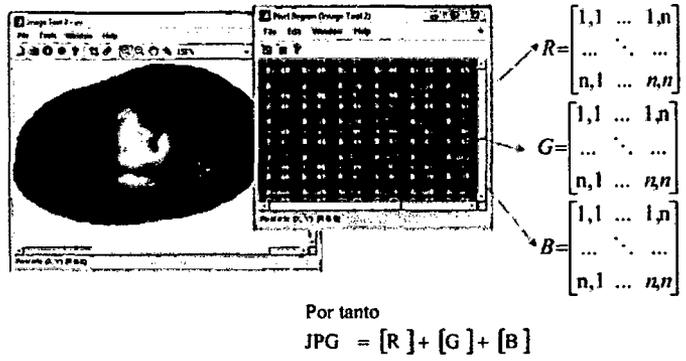


Figura 11. Representación matricial de imagen en formato *.JPG

Las imágenes almacenadas fueron pre-procesadas, a fin de eliminar el fondo de la imagen y permitir una adecuada segmentación, aislamiento de los elementos de interés. Los programas, en lenguaje "m", fueron proporcionados por Huamán y Saldaña (2012), cuyo detalle del algoritmo se aprecia en el Anexo 1 y su resultado al aplicarse en el presente trabajo de investigación se puede apreciar en la Figura 12.

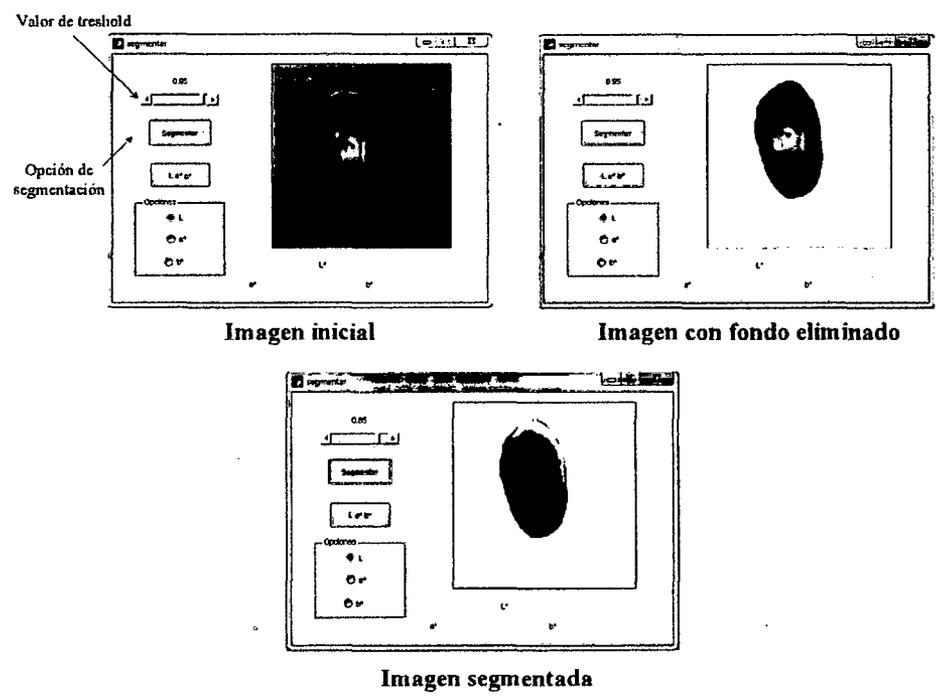


Figura 12. Resultado de la aplicación del algoritmo de segmentación

- Determinación de parámetros de color.- los parámetros de color fueron obtenidos mediante las funciones propuestas por Huamán y Saldaña (2012). Esta función analiza el color de la imagen obtenida al aplicar la función de segmentación.

En dicha imagen al ser, esencialmente, una matriz tridimensional el valor de los pixeles que conforman la matriz se encuentra en el rango de [0 a 255], véase Figura 11. Por tanto, al aplicar la función LAB, funciones propuestas por Huamán y Saldaña (2012), los valores numéricos de cada pixel del elemento de interés, así como su histograma; véase Figura 13.

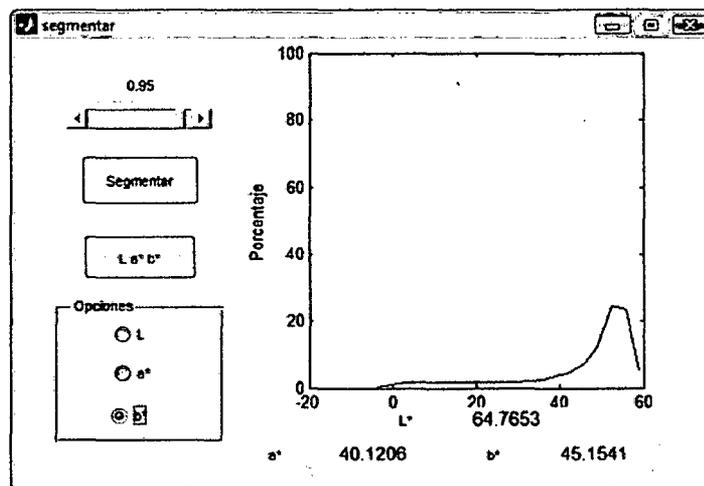


Figura 13. Resultados de la aplicación de función L, a*, b*

Los resultados así obtenidos son registrados para cada una de las muestras previamente codificadas.

Determinación de los parámetros fisicoquímicos de pH, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez en diferentes estados de madurez del tomate (Lycopersicum esculentum)

Para este fin cada una de las muestras fue analizada para determinar el valor de pH, acidez y concentración de sólidos solubles, aplicando los métodos 932.12, 942.15 y 970.21 de la AOAC⁶, modificados para su uso con los frutos en cuestión. El texto integro de estos métodos, así como fotografías del proceso de análisis, se muestran en los anexos.

Calculo de las relaciones el pH, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez con parámetros de datos de color del tomate (Lycopersicum esculentum)

Para relacionar el pH, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez con parámetros de datos de color del tomate se aplicó el análisis estadístico mediante regresiones lineales múltiples, en el software estadístico Stathgraphics 5.1, determinando de esta manera modelos lineales aditivos como el siguiente:

$$\Psi = a_1 \cdot P_1 + a_2 \cdot P_2 + a_3 \cdot P_3 + \varepsilon$$

Donde

Ψ = Variable dependiente; (pH, Acidez, Sólidos solubles totales)

a_i = Constante de la variable independiente i

P_i = Variable independiente i ; (L, a^* , b^*)

ε = Error

Asimismo se realizó el análisis de varianza de los tres factores independientes con la finalidad de determinar el/los factores de mayor relevancia estadística para los modelos anteriormente formulados y poder resumirlos.

⁶ Association of Official Analytical Chemist

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos, como respuestas a cada uno de los objetivos planteados en la presente tesis se muestran en las siguientes páginas.

4.1. Determinación de parámetros de color en diferentes estados de madurez del tomate (*Lycopersicum esculentum*).

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la determinación del color en las muestras analizadas.

Tabla 2. Parámetros de color de las muestras analizadas

Nº	Código	L	a*	b*	Nº	Código	L	a*	b*
1	M-21	59.28	30.45	42.82	16	M-13	62.91	25.04	39.79
2	M-12	65.68	24.17	41.07	17	M-15	63.24	26.33	40.75
3	M-28	57.25	37.74	42.86	18	M-2	73.47	-14.04	44.72
4	M-6	64.6	-1.11	40.95	19	M-8	66.42	15.78	33.72
5	M-16	66.34	26.76	43	20	M-10	67.24	24.03	41.3
6	M-14	60.15	25.9	38.51	21	M-11	66.46	24.1	41.19
7	M-23	58.38	31.37	42.4	22	M-4	71.52	-7.93	42.48
8	M-9	66.83	19.9	37.51	23	M-3	70.53	-8.48	43.86
9	M-30	56.13	47.93	43.04	24	M-5	68.06	-4.52	41.71
10	M-18	67.8	28.66	40	25	M-1	74.74	-17.68	34.99
11	M-22	59.04	31.29	42.39	26	M-7	65.51	7.33	37.33
12	M-25	58.5	33.22	43.66	27	M-20	59.52	29.61	43.24
13	M-24	57.73	31.45	42.41	28	M-27	58.26	36.36	43.88
14	M-17	67.07	27.71	41.5	29	M-19	63.66	29.14	41.62
15	M-29	56.69	42.84	42.95	30	M-26	59.28	34.98	44.91

Fuente: Elaboración propia

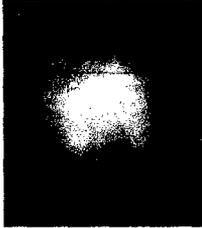
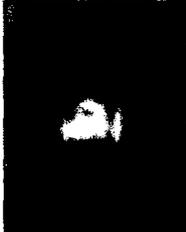
Los valores mínimos y máximos de cada uno de los parámetros de color de las muestras analizadas se muestran en la siguiente tabla

Tabla 3. Mínimos, máximos y deltas de los parámetros de color de las muestras analizadas

Valores	L	a*	b*
Mínimo	56.13	-17.68	33.72
Máximo	74.74	47.93	44.91
Delta	18.61	65.61	11.19

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Ejemplos de parámetros de color en cuatro muestras analizadas

	1		2
			
L	74.74	L	64.60
a*	-17.68	a*	-1.11
b*	34.99	b*	40.94
	3		4
			
L	67.24	L	56.13
a*	24.03	a*	47.93
b*	41.30	b*	43.04

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las muestras anteriormente presentadas, mismas que representan cuatro estadios de madurez, se puede observar una tendencia creciente en cuanto a los parámetros a^* y b^* .

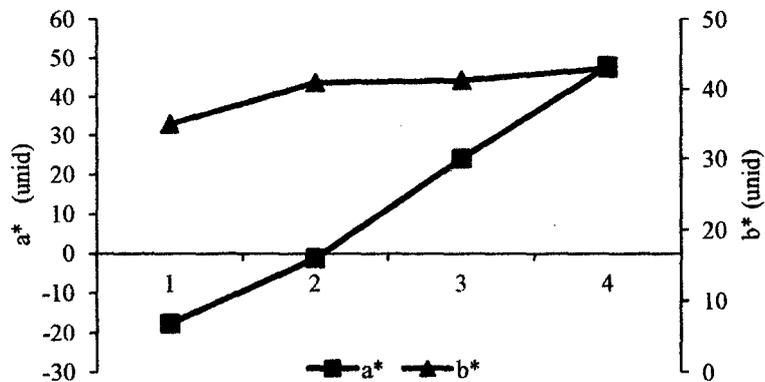


Figura 14. Evolución de parámetros a^* y b^* en cuatro estadios de madurez

4.2. Determinación de parámetros de pH, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez en diferentes estados de madurez del tomate. (*Lycopersicum esculentum*)

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la determinación de los parámetros de pH, acidez y sólidos solubles totales (°Brix) en las muestras analizadas.

Tabla 5. pH, °Brix y Acidez de las muestras analizadas

Nº	Código	°Brix	pH	Acidez (%)	Nº	Código	°Brix	pH	Acidez (%)
1	M-21	4.2	4.8	0.16	16	M-13	4.2	4.9	0.16
2	M-12	4.1	4.9	0.16	17	M-15	4.6	4.9	0.17
3	M-28	4.2	4.9	0.16	18	M-2	4.7	4.8	0.29
4	M-6	4.4	4.9	0.19	19	M-8	4.6	4.9	0.19
5	M-16	4.9	4.9	0.17	20	M-10	3.9	4.9	0.16
6	M-14	4.3	5.0	0.16	21	M-11	4.0	4.9	0.16
7	M-23	4.7	4.9	0.19	22	M-4	3.1	4.9	0.22
8	M-9	4.3	4.9	0.18	23	M-3	3.6	4.9	0.23
9	M-30	4.4	4.8	0.13	24	M-5	3.8	4.9	0.21
10	M-18	4.7	5.0	0.19	25	M-1	3.7	4.7	0.26
11	M-22	4.6	4.8	0.19	26	M-7	4.5	4.9	0.19
12	M-25	4.4	4.9	0.16	27	M-20	3.8	4.8	0.13
13	M-24	4.7	5.0	0.19	28	M-27	4.2	4.9	0.14
14	M-17	4.8	4.9	0.18	29	M-19	4.3	4.9	0.16
15	M-29	4.3	4.8	0.14	30	M-26	4.1	4.9	0.13

Fuente: Elaboración propia

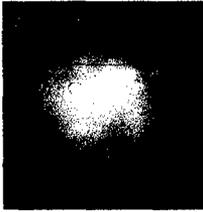
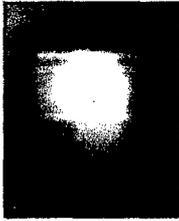
Los valores mínimos y máximos de cada uno de los parámetros fisicoquímicos (pH, °Brix, acidez) de las muestras analizadas se muestran en la siguiente tabla

Tabla 6. Mínimos, máximos y deltas de los parámetros fisicoquímicos evaluados en las muestras analizadas

Valores	°Brix	pH	Acidez
Mínimo	3.10	4.67	0.13
Máximo	4.90	4.98	0.29
Delta	1.80	0.31	0.16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Ejemplos de los parámetros fisicoquímicos evaluados en cuatro muestras analizadas

	1	2
		
°Brix	3.70	°Brix 4.40
pH	4.70	pH 4.90
Acidez (%)	0.26	Acidez (%) 0.19
	3	4
		
°Brix	3.90	°Brix 4.40
pH	4.90	pH 4.80
Acidez (%)	0.16	Acidez (%) 0.13

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las muestras presentadas se presenta la grafica de los parámetros fisicoquímicos evaluados en muestras de cuatro estadios de madurez.

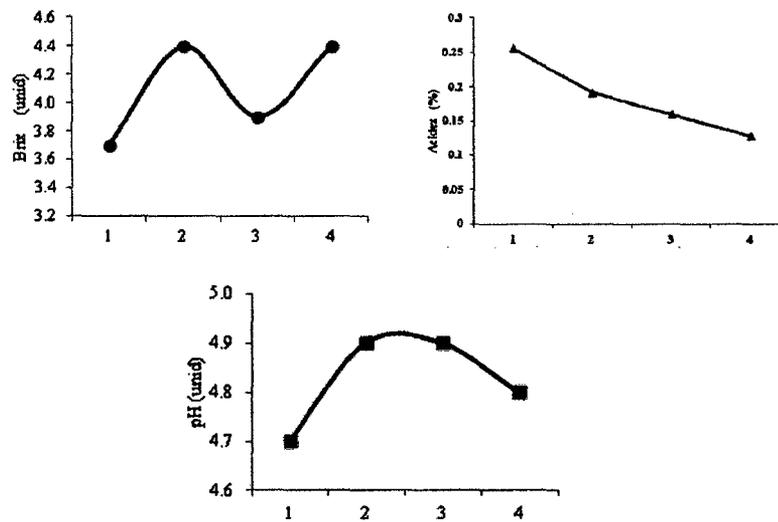


Figura 15. Evolución de parámetros fisicoquímicos evaluados en cuatro estadios de madurez

4.3. Relacionar el pH, concentración de sólidos solubles totales y porcentaje de acidez con parámetros de datos de color del tomate (*Lycopersicum esculentum*)

Luego de realizados los análisis estadísticos fueron determinadas mediante el programa estadísticos Stathgraphics 5.1 se obtuvieron las ecuaciones y estadísticos de estas relaciones, véase Tabla 8.

Tabla 8. Ecuaciones y estadísticos de las relaciones analizadas

Ecuación	R ²	p-valor
$\text{pH} = 0.00252(L) + 0.0014(a^*) - 0.0015(b^*) + 4.7588$	0.052	0.7050
$\text{Acidez (\%)} = 0.00099*L - 0.00161*a + 0.00101*b + 0.10833$	0.7317	0.0000
$\text{SST(}^\circ\text{Brix)} = 0.0098*L + 0.0132(a^*) - 0.0239(b^*) + 4.3488$	0.2027	0.1116

Fuente: Elaboración propia

Por tanto se deduce que:

pH: debido al p-valor (>0.01) no existe relación estadísticamente significativa entre las variables, a un nivel de confianza del 99 %.

Acidez: debido al p-valor (<0.01) existe relación estadísticamente significativa entre las variables, a un nivel de confianza del 99 %.

°Brix: debido al p-valor (>0.01) no existe relación estadísticamente significativa entre las variables, a un nivel de confianza del 99 %

Por tanto; la única relaciones que puede ser modeladas, con regular aproximación ($R^2=0.732\%$), es la acidez.

En este sentido y a fin de proceder a la simplificación del modelo para la acidez obtenido se muestran los datos de la regresión múltiple y el análisis de varianza en las tablas Tabla 9 y Tabla 10.

Tabla 9. Análisis de regresión múltiple

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	p-valor
CONSTANTE	0.10833	0.127836	0.844059	0.4045
a	-0.001614	0.000416	-3.877020	0.0006
b	0,00100866	0.001418	0.666379	0.5120
L	0,00099112	0.001518	0.704082	0.4911

Tabla 10. Análisis de varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P- Valor
Modelo	0.0290134	3	0.00967114	23.63	0.0000
Residuo	0.010643	26	0.000409348		
Total (Corr.)	0.0396564	29			

Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor en las variables independientes es 0.51, 0.49 y 0.0006, perteneciendo a b*, L y a* respectivamente. Sabiendo además que si el p-valor es superior o igual a 0.01, el término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99% (Montgomery, 2005).

Por tanto, se puede obviar el uso de b* y L* y solo considerar el término a*, en este sentido la ecuación que relacionara estas variables es:

$$\text{Acidez} = 0.21768 - 0.0018352(a^*)$$

$$R^2 = 0.724$$

Asimismo, la representación de esta relación se puede apreciar en la figura 16.

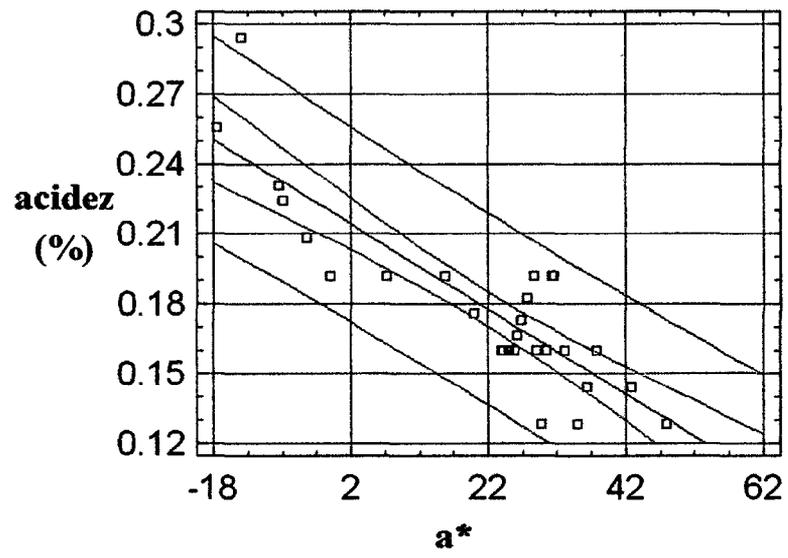


Figura 16. Modelo de la acidez vs a^*

5. DISCUSIÓN

Los valores obtenidos en el proceso de determinación del color de las muestras de tomate, se encontraron en los rangos siguientes: L [56, 74.4], a^* [-17.68, 47.93] y b^* [33.72, 44.91]. De acuerdo a como estos colores se distribuyen en el espacio CIElab, véase Figura 4, los valores de a^* muestran las tonalidades verdes a rojas al pasar de valores negativos a positivos (Westland, 2001). Por tanto, sería posible clasificar a estos frutos de verdes a maduros siguiendo este patrón y aún más utilizarlos, según Shewfelt (2009), en la determinación de la composición de frutales. La validez de la propuesta de Shewfelt (2009) es demostrada en la tabla 4 y figura 14, en las cuales se observa que el parámetro a^* se incrementa a medida que pasamos de estadios de madurez verdes a maduros.

Es así que reordenando los valores encontrados de acuerdo al valor de a^* , considerando que el mínimo valor de a^* es correspondiente a un frutal en estado verde, se obtiene $L=74.74$, $a^* = -17.68$ y $b^* = 34.99$. Estos valores son cercanos a los reportados por Pinheiro y col. (2012) el cual trabajando con muestra de tomate (*Solanum lycopersicum*, cv. 'Zinac') reportó en sus muestras verdes $L = 52.2 \pm 2.4$, $a^* = -13.5 \pm 1.1$ y $b^* = 22.6 \pm 1.5$; en estas se puede apreciar que el parámetro a^* es cercano al obtenido en la presente investigación, el L difiere en casi 20 unidades así como el b en aproximadamente 10, esto podría deberse a la iluminación utilizada y el equipo que se utilizó para la determinación de los parámetros de color, puesto que como mencionan Cheng y Sun (2006) el uso de colorímetros limita el área de análisis a solo un par de centímetros cuadrados, dejando buena parte de la muestra sin analizar y a decisión del experimentador.

Igualmente se determinaron algunos parámetros fisicoquímicos, con el fin de relacionarlos con los parámetros de color; el rango, en las muestras analizadas, de estos parámetros fue pH [4.67, 4.98], acidez [0.13, 0.29], contenido de sólidos solubles [3.1, 4.9] véase tablas 5 y 6. Procediendo similarmente al caso anterior se obtiene, para el producto en estado verde, se obtuvieron valores de 3.7 (°Brix), 4.7 (pH) y 0.256 (porcentaje de acidez); estos valores son cercanos a los reportado por Pinheiro y col. (2012), quien reporta en sus muestras verdes pH = 4.2 y °Brix = 4.3, no incluyendo este autor información sobre acidez, pudiendo atribuirle las diferencia a factores tanto de variedad y manejo agrícola como lo menciona Cáceres (2010).

En el caso de nuestra investigación se analizo la existencia de relaciones estadísticamente significativas entre los parámetros de color, expresados en coordenadas del espacio CIELa*b*, y los parámetros fisicoquímicos, pH, acidez y contenido de sólidos solubles totales. Es así que en un primer intento de modelar estas relaciones se aplicaron ecuaciones lineales múltiples, cuya forma genérica se aborda en el apartado 3.7. Tal como comenta Montgomery (2005), el análisis del grado de ajuste de una regresión se realiza mediante el valor del coeficiente de correlación (R^2), cuyo rango varía entre 0 y 1, siendo mayor el ajuste mientras el R^2 sea más cercano a la unidad. En el caso de las regresiones múltiples, determinadas para este estudio, se observa poco ajuste (R^2 entre 0.052 y 0.732). En este mismo sentido la propiedad que mejor ajuste presenta es la acidez con R^2 de 0.732.

Además y a efecto de simplificar estas relaciones, facilitando de esta manera su uso, se determino el efecto de los distintos parámetros de color en el modelado de las propiedades fisicoquímicas en estudio, mediante análisis de varianza, demostrando que la variable de mayor interés es a*. Esto queda al determinar una regresión simple entre

la acidez y el parámetro a^* , véase figura 16 y la ecuación simplificada de la acidez, presentando esta regresión R^2 de 0.724 cercano al R^2 de 0.732 de la regresión múltiple.

Es así que el ajuste de la regresión de la acidez, tanto múltiple como simple, demuestra que es posible considerar el uso de los parámetros de color para la determinación de este parámetro fisicoquímico. Sin embargo, a fin de mejorar el nivel de ajuste se debe trabajar como Schouten (2007), quien haciendo uso de modelos más complejos alcanzó valores de R^2 de 0.976.

6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados anteriormente presentados se obtienen las siguientes conclusiones:

- Es posible determinar los parámetros de color, en el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$, en muestras de tomate (*Lycopersicon esculentum*) mediante la tecnología de visión artificial.
- El parámetro de color de mayor interés para el modelado de propiedades, por su tendencia constante durante la maduración, es el a^* .
- La acidez (%) muestra tendencia decreciente a lo largo del proceso de maduración.
- La acidez muestra el mejor ajuste en su relación con los parámetros de color (R^2 0.73.2); siendo posible simplificar las relaciones al uso exclusivo del parámetro a^* .

7. RECOMENDACIONES

- Aplicar el sistema de visión por computadora y análisis de color en otros productos frutícolas de la región Amazonas.
- Desarrollar modelos de predicción de otras características fisicoquímicas, mejicanices, etc. mediante sistemas de visión por computadora.
- Desarrollar otros sistemas que analicen la totalidad de la superficie de la muestra.
- Desarrollar a partir de estos modelos sistemas portátiles de determinación de la composición para productos frutícolas.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdullah MZ, A.-A. S.-M. (2000). Quality inspection of bakery products using color-based machine vision system. *Journal of Food Quality*, 39–50.
- Abdullah MZ, F.-S. A.-A. (2005). Automated inspection for color and shape grading of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) using machine vision sensor. *Transactions of the Institute Measurement and Control*, 65–87.
- Artés-Calero, F. y Artés-Hernández. F. (2003). Tratamientos postrecolección del tomate fresco, tendencias e innovaciones. Grupo de Postrecolección y Refrigeración. Departamento de Ingeniería de Alimentos. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Brosnan, T (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision. *Journal of Food Engineering*, 125–135.
- Cáceres, L. (2012). Manejo postcosecha de los frutos de tomate de árbol (*Cyphomandra betacea*) y su relación con el tiempo de vida útil en el mercado central del canton Ambato. Tesis de Maestría. Universidad Técnica de Ambato. Ambato - Ecuador.
- Carrefio, J. Martinez, A. Almeda, L. Fernandez, J. (1995). Proposal of an index for the objective evaluation of the colour of red table grapes. *Food Research International*. 28. 373-311.
- Cheng, J. y Sun, D. (2006). Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review. *Journal of Food Engineering*. 72. 39–55.
- Dobre, T. y Sánchez, J. (2007). *Chemical Engineering, modelling, simulation and similitude*. Alemania: Weinheim : Wiley-VCH.
- Du, C. y Sun, D. (2004). Shape extraction and classification of pizza base using computer vision. *Journal of Food Engineering*, 489–496.

- FAO. 2006. Tomate.
Disponble en:
http://www.fao.org/inpho_archive/content/documents/vlibrary/AE620s/Pfrescos/TOMATE.HTM
Ultimo acceso: agosto 2012.
- García, E. y Ayuga, F. (1993). Diseño y Construcción de Industrias Agroalimentarias. Edit. Mundi-Prensa. España
- Herrero-Langreo, A. Fernández-Ahumada, B. Roger, B. Palagós, B. Lleó, C. (2010). Combination of optical and non-destructive mechanical techniques for the measurement of maturity in peach. *Journal of Food Engineering*. 108.150–157
- Huaman, R. y Saldaña, E. (2012). Cambios en los parámetros de color de rodajas de yacón (*Smallantus sonchifolius*) mínimamente procesadas obtenidas mediante visión computacional. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Trujillo.
- Kader, A. (1993). Postharvest handling. En *The Biology of Horticulture. An Introductory Textbook*. J. Willey & Sons, Inc. New York. Cap. 15. 352-377.
- Leon, K. M. (2006). Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International*, 1084–1091.
- López, G. y Loja, C. (2012). Tesis: Efecto de diferentes tiempos y potencias durante el calentamiento por microondas en los índices de color, sólidos solubles y acidez titulable en pasta de tomate. UNTRM. Perú.
- Mohammad, N. (2005). *Digital Image Fundamentals in Matlab*. Edit. AuthorHouse. USA.
- Montgomery, D. (2005). *Diseño y análisis de experimentos*. Edición 2. Editor Limusa-Wiley. USA.

- Pearson, T. (1996). Machine vision system for automated detection of stained pistachio nuts. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 203-209.
- Pedreschi F, L. J. (2006). Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International*, 1092–1098.
- Pinheiro, J. Alegria, C. Abreu, M. Gonçaves, I. Silva, C. 2012. Kinetics of changes in the physical quality parameters of fresh tomato fruits (*Solanum lycopersicum*, cv. 'Zinac') during storage. *Journal of Food Engineering*. 114.338–345.
- Ruiz, M., Ramos, I. y Toro, M. 2006. New trends in software process modeling. Vol. 18. 18 vols. *Software Engineering and Knowledge Engineering*. Estados Unidos: World Scientific Publishing Co.
- Sandeep, K., Irudayaraj, J. y Soojin, J. 2001. Introduction to modeling and numerical simulation. En *Food processing operations modeling: design and analysis*. Food science and technology. Estados Unidos: Marcel Dekker Inc.
- Shewfelt, R. 2007. *Measuring Quality and Maturity En Postharvest Handling: A Systems Approach*. Elsevier Inc.
- Schouten, R. Huijben, T, Tijskens, L. Kooten, O. 2007. Modelling quality attributes of truss tomatoes: Linking colour and firmness maturity. *Postharvest Biology and Technology*. 45.298–306.
- Sun D. y Du, C. (2004). Segmentation of complex food images by stick growing and merging algorithm. *Journal of Food Engineering*, 17–26.
- Sun, D. (2000). Inspecting pizza topping percentage and distribution by a computer vision method. *Journal of Food Engineering*: 245–249.

- Tabares, C. y Velasquez, J. (2003). Estudio de la vida de anaquel del tomate de árbol (*Cyphomandra betacea*) osmodeshidratado empacado en atmosferas modificadas. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia.
- Tao Y, H. P. (1995). Machine vision for color inspection of potatoes and apples. *Transactions of the ASAE*, 1555–1561.
- Vargas, H. 2012. Tesis: Efecto de las variables del proceso de tostado, tiempo y temperatura, en los niveles de color del café producido en la cooperativa COOPARM – Rodríguez de Mendoza. UTRM. Perú
- Verboven, P. 2011. Fruit Microstructure Evaluation Using Synchrotron X-Ray Computed Tomography. En *Food Engineering Interfaces, Food Engineering Series*. Springer Science Business Media.
- Westland, S. 2001. *Coloration Technology*. Colour e imaging Institute, university of derby.

ANEXOS

Anexo 1. Algoritmo de adquisición y procesamiento de las imágenes

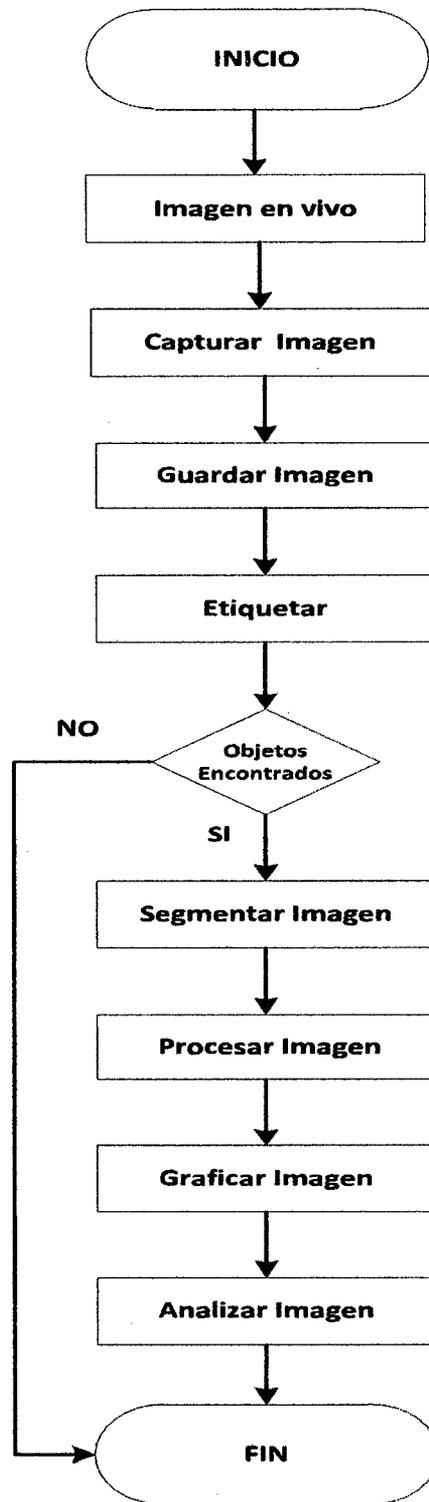


Figura 17. Reprocesamiento y segmentación de imágenes

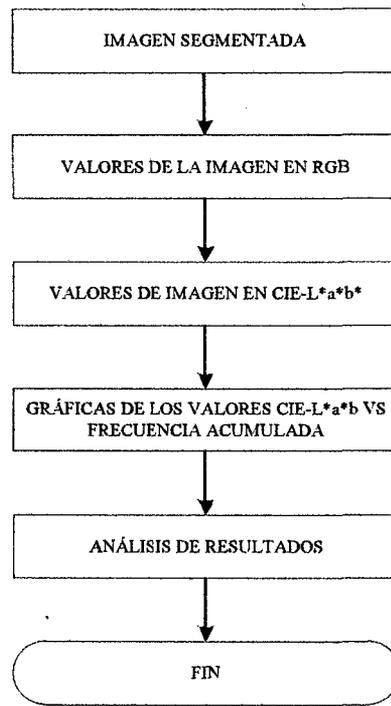
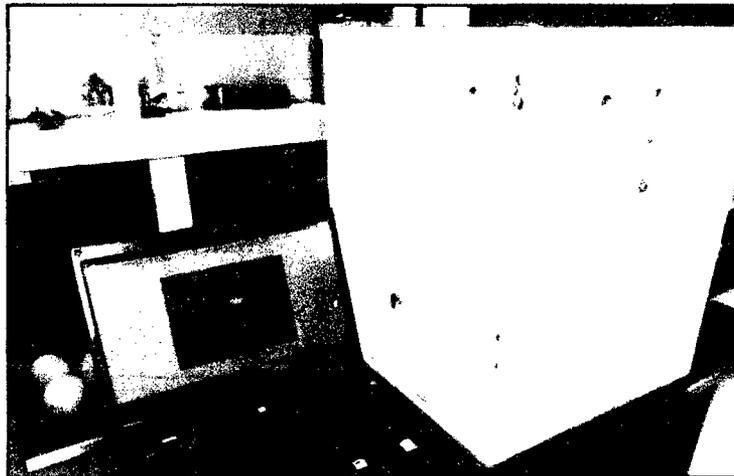


Figura 18. Algoritmo utilizado para el análisis de la imagen.

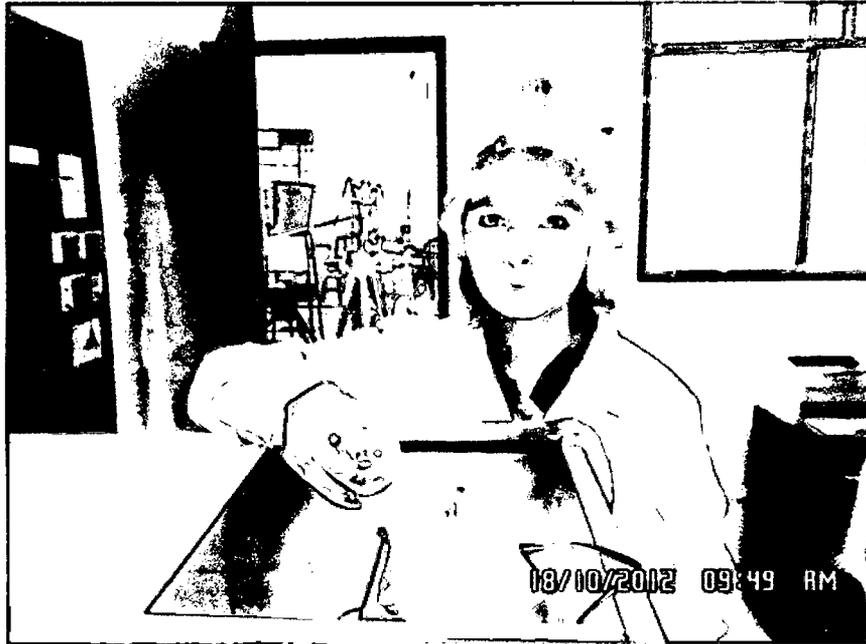
Anexo 2. Fotografías



Fotografía 1. Tesista en los ambientes del Laboratorio de Ingeniería de la UNTRM



Fotografía 2. Equipo utilizado para la adquisición de imágenes y determinación de parámetros de color



Fotografía 3. Colocación de muestras para adquisición de imágenes



Fotografía 4. Preparación de muestras para análisis fisicoquímicos



Fotografía 5. Desarrollo de pruebas fisicoquímicas

Anexo 3. Métodos de determinación del pH y °Brix

La determinación del porcentaje de sólidos solubles (°Brix) se realizó mediante el método oficial AOAC 932.12.

**AOAC Official Method 932.12
Solids (Soluble)
In Fruits and Fruits Products**

**Refractometer Method
Final Action 1980**

(Insoluble matter present. Applicable to fresh and canned fruits, fruit jellies, marmalades, and preserves)

% Soluble solids = % solids determined by refractometer x (100-b)/100, where b= % H₂O -in- soluble solids.

Note: U.S. Federal standards for frozen fruits, canned fruits, fruits jellies, and preserves make no correction for H₂O-insoluble solids, invert sugar, or other substances.

Reference: JAOAC 15,384 (1932)

**AOAC Official Method 942.15
Acidity (Tritable)
Of Fruit Products
Codex-Adopted -AOAC Method**

Final Action 1965

Tritable acidity can be expressed conventionally in g acid per 100 g or per 100 mL, as appropriate to the acid; form malic use 0.067 as factor; oxalic acid, 0.045; citric acid monohydrate, 0.070; tartaric acid, 0.075; sulfuric acid, 0.049; acetic acid, 0.060; lactic acid 0.090.

(a) Colorless or slightly colored solutions. - Dilute to ca 250 mL, with neutralized or recently boiled H₂O, 10 g prepared juice, or 25 mL. Tritable with 0.1 N alkali, using 0.3 mL phenolphthalein for each 100 mL solutions being titrated, to pink persisting 30 s. report as mL 0.1 N alkali/100 g or 100 mL original material.

(b) Highly colored solutions. - Dilute sample of known weight with neutralized H₂O and titrate to just before end point with 0.1N alkali, using 0.3 mL phenolphthalein for each 100 mL solution being titrated. Transfer measured volume (2 or 3 mL) of solutions into ca 20 mL neutral H₂O in small beaker. (In this extra dilution, color or fruits juice becomes so pale that phenolphthalein color is easily seen.) If test shows that an end point is not reached, pour extra diluted portion back into original solution, add more alkali, and continue titration to end point. By comparing dilutions in small beakers, differences produced by few drops 0.1 N alkali can be easily observed

AOAC Official Method 970.21
pH of Cacao Products
Potentiometric Method
First Action 1970
Final action 1974

- (a) For products other than cacao butter.- weigh 10 g sample into 150 mL beaker and slowly add, with stirring 90 mL boiling H₂O. Suspension must be free from lumps. Filter, cool filtrate to 20-25 °C, and immediately determine pH, using electrodes and potentiometer standardized with buffer at pH 4.0 and 6.86. Report to nearest 0.1 pH unit.
- (b) For cacao butter. - Melt sample and mechanically stir 5 min with equal weight of H₂O at 50 °C. Separate aqueous layer, cool to 20 – 25 °C, filter, and determine pH as in (a).

References: Analytical method of the office international du Cacao et du Chocolat Niklausstrase 4, Zurich, Switzerland, page 9-E/1963. JAOAC 53, 474 (1970).