

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Análisis de Daños Ocasionados por Mildiú (*Pseudoperonospora cubensis* L) en
Pepino (*Cucumis sativus* L) Mediante Segmentación de Imágenes Digitales

Por:

CARLOS DÍAZ QUINTERO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Análisis de Daños Ocasionados por Mildiú (*Pseudoperonospora cubensis* L) en
Pepino (*Cucumis sativus* L) Mediante Segmentación de Imágenes Digitales

Por:

CARLOS DÍAZ QUINTERO

TESIS

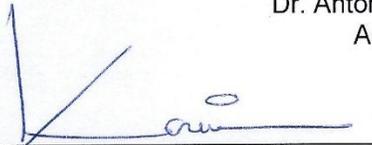
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



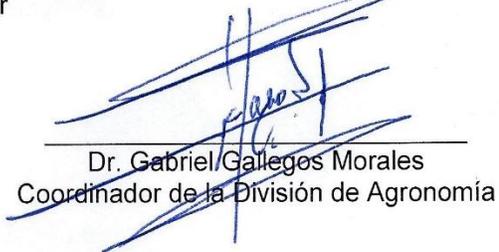
Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor Principal



Dr. Karim de Alba Romenus
Coasesor



Ing. Rodrigo Morales García
Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2018

Agradecimiento

A la **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO** que la conforman maestros, alumnos y administrativos, y a la Federación por apoyar a este tipo de instituciones cuya finalidad es entregar al campo mexicano profesionistas con la capacidad moral e intelectual para ayudar a las familias más vulnerables a salir del rezago económico.

Al **Dr. Karim de Alba Romenus**, por apoyar la iniciativa de la elaboración de esta investigación, por el tiempo dedicado a las revisiones y por crear este tipo de proyectos que sirven para innovar las técnicas aplicadas al campo.

Al **Dr. Antonio Juárez Maldonado** por mostrarme en sus clases el poder de la investigación, por transmitirme el conocimiento que ha adquirido y por apoyar este proyecto de investigación.

Al **Ing. Rodrigo Morales García** por todo el apoyo en la realización de este estudio, por estar conmigo en los momentos difíciles y ser mi amigo durante estos cinco años.

A **los profesores e investigadores del Departamento de Botánica de esta Universidad** que con su quehacer diario transmitieron en mí a lo largo de cinco años conocimientos académicos y las ganas de salir adelante aspirando siempre a ser como ellos.

A **mi familia** por el apoyo incondicional, así como la confianza depositada en mí para poder entregarles un título universitario.

A **mis amigos** cuyas vivencias, consejos y apoyo los convirtieron en la familia que tuve en Saltillo durante todo este tiempo, cada momento y cada recuerdo han hecho de ésta la mejor experiencia vivida.

A todas las personas que me apoyaron para poder seguir con mis estudios: amigos y conocidos de San Luis de la Paz, Guanajuato; que con sus palabras de aliento motivaron mis ganas de terminar mi formación profesional.

Dedicatoria

A mi familia:

Mi madre **Josefina Quintero Sánchez**, estas palabras no son suficientes para agradecer todo el apoyo, el amor y el respeto que has tenido a cada decisión que he tomado, el amor más puro y más sincero lo conozco por ti hacia tus hijos, eres mi mayor inspiración y mi mayor motivo para salir adelante juntos, siempre te agradeceré por todo lo que haces por nosotros. Te amo infinitamente.

A mi padre **Adolfo Díaz Benavidez**, a todo su esfuerzo que por años ha realizado por nuestra familia, por apoyarme en mis estudios y por las palabras de aliento que me brindó en todo momento, agradezco su compromiso para sacarnos adelante y confío en que en el futuro podremos gozar de los resultados de todo ese esfuerzo.

A mis hermanos **Moisés, Benito, Zoila, Carmen y Adolfo** por su apoyo, sus palabras, su comprensión, su cariño, sus bromas, su amistad y por regalarme la fortuna de acompañarme desde que era pequeño hasta el final de esta etapa; agradezco cada gesto que han tenido conmigo para poder realizar mis estudios.

Índice general

Índice general.....	i
Índice de cuadros.....	iii
Índice de figuras.....	iv
Resumen.....	1
Introducción.....	3
Objetivos	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos	5
Hipótesis	5
Revisión de literatura	6
Proceso de segmentación.....	7
Tipos de segmentación	8
Segmentación basada en la discontinuidad y similitud	9
Derivada de primer orden, el operador gradiente.....	9
Derivada de segundo orden, el operador Laplaciano.....	10
Segmentación utilizando umbralización	12
Segmentación orientada a regiones.....	13
Importancia de la segmentación	13
Aplicaciones de la segmentación de imágenes digitales	14
Propiedades del color	14
Modelos RGB.....	15
Modelo HSV.....	18
Correspondencia entre RGB y HSV.....	18
Matiz o tono (H).....	21
Saturación o brillo (S).....	21
Valor o luminosidad (V).....	21
Otros modelos de color	21

Modelo CMYK.....	22
Modelo XYZ	22
Modelo HSI	23
Conversión entre modelos de color	24
Conversión RGB a HSV	24
Conversión entre RGB y XYZ	26
Procesamiento digital de imágenes	26
Detección de enfermedades utilizando imágenes digitales.....	27
Cultivo de pepino	28
Características biológicas del pepino.....	30
Plagas del pepino	30
Pseudoperonospora cubensis.....	31
Materiales y métodos	36
Metodología utilizada	37
MATLAB.....	38
Descripción de los Comandos Utilizados por MATLAB®	38
Particularidades del programa MATLAB® y sus comandos básicos.....	39
Comandos relacionados al Manejo de Imágenes	39
Programación utilizando MATLAB® R2018a	40
Obtención del porcentaje de afectación por hoja utilizando MATLAB® R2018a	45
Obtención del porcentaje de color en hojas hoja utilizadas como testigos	47
Resultados y discusión	48
Resultados de la obtención del umbral en la segmentación	48
Resultados de la obtención de porcentaje de afectación	49
Resultados de la segmentación de hojas testigo	54
Conclusión	58
Literatura citada	59

Índice de cuadros

Tabla 1. Datos de precios de la producción de pepino al 2015	29
Tabla 2 Valores registrados para la determinación del umbral en la identificación de Mildiú.....	48
Tabla 3 Porcentajes de afectación obtenidos	49
Tabla 4. Comparación de las características de las imágenes con menor y mayor porcentaje de afectación detectado por el programa	51
Tabla 5. Resultados obtenidos de la segmentación de las hojas testigo	54
Tabla 6. Comparación de las características de las imágenes con menor y mayor porcentaje de afectación detectado por el programa	55

Índice de figuras

Figura 1. Etapas del procesamiento digital de una imagen	8
Figura 2. Modelo de color RGB	16
Figura 3. Ejemplo de la configuración del Modelo de color RGB	16
Figura 4. Codificación de la intensidad de valores de RGB en Bites.....	17
Figura 5. Espacio de color RGB.....	17
Figura 6. Transformación del espacio de color RGB al HSV.....	18
Figura 7. Correspondencia entre modelos RGB y HSV	19
Figura 8. Correspondencia entre sectores del modelo HSV	19
Figura 9. Correspondencia entre el subcubo del modelo RGB y el cono del modelo HSV.....	20
Figura 10. Esquema del árbol de Munsell	20
Figura 11. Aspecto de una hoja de pepino afectada por Mildiú.....	33
Figura 12. Aspecto inicial del programa MATLAB®.	38
Figura 13. Aspecto inicial del programa MATLAB®.	41
Figura 14. Icono de New Script.	41
Figura 15. Pestaña de New Script.....	41
Figura 16. Aspecto que deberá tener la ventana de programación.....	42
Figura 17. Especificación del comando a modificarse para valores de amarillo.	43
Figura 18. Obtención de figura original en HSV.	44
Figura 19. Aspecto de la imagen segmentada por discontinuidad con los valores que fueron colocados en el comando.	44
Figura 20. Comparación de la imagen original y la que resulta de la segmentación.	45
Figura 21. Aspecto de la ventana de comandos al realizarse la operación de obtención de porcentajes.	47
Figura 22. Relación entre los porcentajes de afectación agrupados por rangos.	52
Figura 23. Número de registros con relación entre los porcentajes de afectación agrupados por números enteros.	53
Figura 24. Número de registros en hojas testigo con relación entre los porcentajes de afectación agrupados por números enteros.	55

Resumen

La presente investigación se realizó con la finalidad de generar un programa usando MATLAB® para segmentar imágenes digitales de hojas de pepino con daño ocasionado por *Pseudoperonospora cubensis* L y así determinar las áreas afectadas en las mismas y además de conocer los valores del sistema HSV en color amarillo que permitieron obtener una imagen segmentada para posteriormente calcular el porcentaje de afectación por hoja. Los resultados obtenidos muestran que los valores del umbral en amarillo para Hue en el modelo de color HSV van de 40 a 60 y el mayor porcentaje de afectación obtenido es de 36.1496%. Los resultados del umbral para Hue en color amarillo se obtuvieron mediante el análisis de 30 imágenes que fueron obtenidas mediante toma directa de fotografía a plantas infestadas con Mildiú donde se comprobara que se tuvo la presencia del hongo que ocasiona la enfermedad conocida como Mildiú, los resultados fueron comprobados en 70 imágenes más dando así un total de 100 imágenes que fueron utilizadas para la segmentación utilizando modelos de color RGB que fueron transformados a HSV para así conocer los valores encontrados. Los resultados fueron comprobados al segmentar 20 imágenes más que presentaban la enfermedad conocida como cenicilla la cual es ocasionada por el hongo *Sphaerotheca fuliginea* Schlechtend.:Fr, Pollaci y también se usaron 20 imágenes que no presentaban ninguna enfermedad evidente ni daños de tipo mecánico o deficiencias

nutricionales que fueron obtenidas por el mismo medio y cuyos resultados arrojaron valores menores al 1% de presencia de pixeles con esta característica, se asume que se debió a la calidad de la imagen, la resolución de la cámara o daños propios a tejidos necróticos en el caso de presencia de *S. fuliginea*. De esta manera se concluyó que el uso del programa MATLAB® para la segmentación mediante umbralización de imágenes digitales en modelos de color RGB convertidos a RGB muestra la presencia de Mildiu en cultivos de pepino y sirve para obtener datos de la superficie del limbo afectada por Mildiú. De esta manera se presenta la metodología empleada para la programación usando MATLAB® que permita la segmentación para estos fines.

Palabras clave: segmentación, Mildiú, Modelos de color, valores de Hue.

Introducción

La identificación automática de enfermedades en plantas por inspección visual puede ser de gran beneficio para aquellos usuarios que tienen poca información sobre el cultivo que están produciendo, tal como lo mencionan y afirman diversos estudios científicos, por mencionar algunos se tiene lo publicado por Vázquez-López, N. *et al.*, (2011), Guzmán, O. *et al.*, (2003), Padrón-Pereira C., (2009; 2013), Castro J *et al.*, (2012), o sus aplicaciones en la identificación de plagas y enfermedades de los cultivos como lo menciona Guzmán, O. *et al.*, (2003).

En los últimos años, el procesamiento digital de imágenes y la visión artificial han demostrado ser herramientas muy potentes en el área de la agricultura. Cada vez se pueden encontrar más aplicaciones para la supervisión y gestión automática de los procesos hortícolas basados en imágenes, cuyo objetivo es reducir costos y aumentar la productividad de los cultivos. (Hernández, J. 2016).

Diversos han sido los estudios acerca de temas relacionados con los colores en las imágenes digitales, tal es el caso de lo descrito por Valencia, E. (2007) el cual argumenta que “el procesamiento de éstas involucra metodologías para el análisis de imágenes y sirve para obtener información cuantitativa, esto mediante el avance tecnológico en el desarrollo de hardware y software que provee herramientas para la captura de imágenes y algoritmos para el análisis que permite evaluar de manera no destructiva y objetiva, por ejemplo, el color”.

Vázquez-López N. *et al.*, (2011), citan a Yud-Ren *et al.*, (2002) mencionando que en el campo de la agricultura se han desarrollado muchas aplicaciones usando visión por computadora; ya que los sistemas de este tipo no sólo reconocen el tamaño, forma, color y textura de los objetos, sino que también proporciona atributos numéricos de los objetos o escenarios que se examinan.

En el presente trabajo de investigación se desarrolló con la finalidad de desarrollar un programa que sea capaz de detectar la presencia de Mildiú (*Pseudoperonospora cubensis*) en el cultivo de pepino. La importancia de este trabajo radica en que según Ruíz-Sánchez *et al.*, (2008), Cohen Y., *et al.*, (2014), Ruíz-Sánchez *et al.*, (2008) y

Shetty, N. *et al.*, (2002) esta enfermedad afecta fuertemente la producción de cucurbitáceas en general y el cultivo del pepino no es la excepción. Por ello, el poder prevenir la presencia de esta enfermedad en los cultivos de pepino resulta de gran utilidad para evitar riesgos fitosanitarios, así como pérdidas en la producción.

Basándose en lo referido a las propiedades del color, así como en metodologías que especifican a los modelos de color RGB y HSV se creó un umbral general para la segmentación de las imágenes que presentan sintomatología de daño por Mildiu, para ello se utilizó el programa MATLAB® y se trabajó la umbralización haciendo segmentación por discontinuidad, segmentando primero 30 imágenes para determinar el umbral idóneo, y posteriormente se segmentaron 70 imágenes más, corroborando este parámetro de datos, el cual selecciona tonalidades en amarillo. Finalmente, la eficiencia en la programación se comprobó segmentando 20 imágenes que presentaban daños por cenicilla y 20 más que se consideraron sanas.

En general, se obtuvo un programa capaz de seleccionar en imágenes digitales la presencia de la enfermedad conocido como Mildiú esponjo, ocasionado por *P. cubensis*, además de que se determinó el porcentaje de afectación en cuanto a la superficie de la hoja; esto se logró usando el mismo programa.

Los resultados obtenidos muestran que, para la detección de Mildiú en hojas de pepino se debe localizar un umbral de color amarillo entre 40 y 60 en valores de HUE. Además, se detectó que las afectaciones en cuanto a superficie de lámina foliar van de 1 a 36%, se identificó además que el máximo de área dañada por esta enfermedad es de un 36.1496% del área de la hoja.

Objetivos

Objetivo general

Identificación de los daños ocasionados por Mildiú (*Pseudoperonospora cubensis* L) en hojas de pepino (*Cucumis sativus* L) mediante la fragmentación de imágenes digitales.

Objetivos específicos

1. Elaborar un programa usando MATLAB® para la segmentación de imágenes digitales de hojas de pepino afectadas por Mildiu.
2. Determinar el valor de Hue en sistemas HSV, para color amarillo en la identificación de daño causado por Mildiú.
3. Identificar hojas dañadas por presencia de Mildiú.
4. Obtener el área afectada por Mildiú en las hojas de pepino a fin de obtener el porcentaje de daño ocasionado por el hongo.

Hipótesis

Es posible detectar, mediante la segmentación de imágenes digitales y usando la herramienta MATLAB®, las hojas de pepino afectadas por el hongo Mildiú y conocer el porcentaje de afectación de dicha enfermedad en la hoja.

Revisión de literatura

La segmentación es un concepto usado en el tratamiento digital de una imagen. Según lo mencionan Angulo J. y Serra J. (2005) “la segmentación de una imagen implica la detección, mediante procedimientos de etiquetado determinista o estocástico; esto es, involucrando resultados al azar o no; en los contornos o regiones de la imagen, basándose en las propiedades del color como la información de la intensidad y/o la información espacial”.

Padrón C. (2009), menciona que “la caracterización de un sistema de captación de imagen digital consiste en construir un modelo que relacione las distribuciones espectrales de energía del estímulo con los valores digitales de la imagen y estos, a su vez, con la respuesta del sistema visual humano”.

Una imagen digital proporciona mucha información que, generalmente, necesita ser organizada para entender mejor los procesos que la originan, la organización más comúnmente utilizada es la de dividir la imagen según alguna característica o propiedad de las zonas localizadas. A la técnica matemática que consiste en dividir en un conjunto de datos, en este caso a la imagen, en subconjuntos llamados regiones o zonas que comparten alguna propiedad se le denomina “segmentación”. (Martín J., 2017).

Una imagen puede ser definida como una función bidimensional de intensidad de luz $f(x, y)$, en donde x e y representan las coordenadas espaciales y el valor de f un punto cualquiera; (x, y) es proporcional al brillo (o nivel de gris) de una imagen en ese punto. Una imagen digital es una imagen $f(x, y)$ que se ha discretizado tanto en coordenadas espaciales como en el brillo; y puede considerarse como una matriz, cuyos índices de fila y de columna identifican un punto de la imagen y el valor del correspondiente elemento de la matriz indica el nivel de gris en ese punto. Los elementos de una distribución digital de este tipo se denominan *elementos de la imagen* o más comúnmente *píxeles*, abreviatura de su denominación inglesa “*picture elements*”. (La Serna, N. y Román, U. 2009).

Las técnicas de segmentación pueden darse mediante agrupamiento de píxeles, en algún espacio de colores de acuerdo a una o más características, o usando el píxel como referencia para la segmentación de los algoritmos que usan agrupamiento difuso en los espacios de color. Éstas pueden ser basadas en el área, ya sea por crecimiento de regiones o por división y combinación de regiones, o bien, segmentación basada en orillas, la cual se divide en técnicas locales o globales. (Báez J. *et al.* 2004).

Proceso de segmentación

Basado en lo descrito por La Serna, N. y Román, U. (2009), el proceso de la segmentación consta de seis pasos requeridos para el proceso, la obtención de resultados y finalmente la toma de decisiones con los resultados obtenidos, estos pasos se describen a continuación.

- 1.- El proceso de segmentar una imagen inicia con la adquisición de la misma, en donde se requiere utilizar un sensor de imágenes, por ejemplo, la luz en la fotografía o los rayos X en las radiografías.
- 2.- La siguiente etapa es el preprocesamiento, en donde se detectan y eliminan las fallas que pudieran existir en la imagen para mejorarla. Las etapas más utilizadas para este fin son: a) mejora de contraste, b) eliminación de ruido y la restauración.
- 3.- Seguido a esto viene la segmentación, dónde la imagen se divide en sus partes constituyentes u objetos. Las técnicas básicas de esta etapa son aquellas que se orientan a: a) píxeles, b) a los bordes, y c) a las regiones. Sin embargo, las técnicas no son excluyentes, sino que se combinan de acuerdo al tipo de aplicación utilizada.
- 4.- La siguiente etapa es la descripción o extracción de características, la cual consiste en extraer características con alguna información cuantitativa de interés o que sean fundamentales para diferenciar una clase de objetos de otra.

5.- La etapa de reconocimiento es el proceso que asigna una etiqueta a un objeto, basándose en la información proporcionada por sus descriptores. La interpretación implica asignar significado a un conjunto de objetos reconocidos.

6.- Para terminar con el proceso, se origina la etapa Base de Conocimiento, que va a almacenar el dominio del problema para guiar la operación de cada módulo de procesamiento, también controla la interacción de dichos módulos.

Las etapas del procesamiento digital de una imagen se muestran en el siguiente esquema

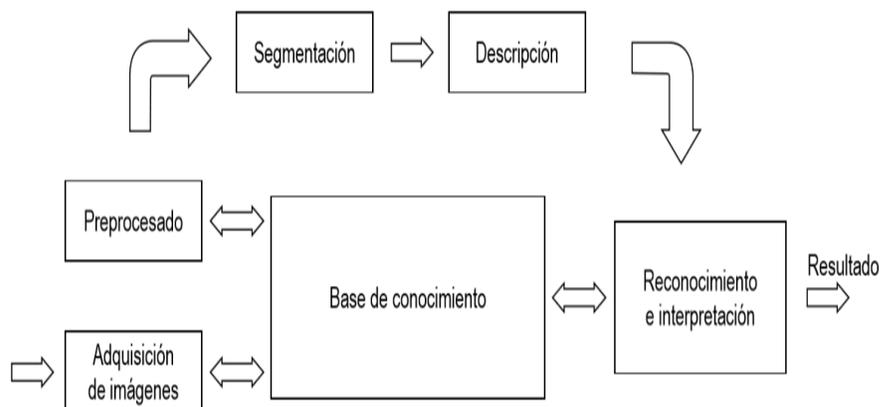


Figura 1. Etapas del procesamiento digital de una imagen. Tomado de: De La Serna, N. Y Román, U. (2009).

Tipos de segmentación

Los atributos básicos de la segmentación son: la luminosidad en imágenes monocromáticas, los componentes de color en imágenes en color, textura, forma, etc. (Gonzales R. y Woods R. 1993).

La segmentación automática es una de las tareas más difíciles del procesamiento de imágenes, esta etapa determina el eventual éxito o fracaso del análisis, de hecho, rara vez llega a alcanzar una solución satisfactoria, por lo que se debe buscar un método alternativo para la verificación de resultados. En el proceso de detectar las partes de

una imagen se identifican bordes de imágenes, o se segmenta ésta en regiones, líneas o curvas, etc. Otra definición considera a la segmentación como la clasificación de los puntos de la imagen (píxeles), indicando las clases a las que pertenecen estos. (La Serna, N. y Román, U. (2009).

Los algoritmos de segmentación de imágenes monocromáticas generalmente se basan en una de las dos propiedades básicas de los valores el nivel de gris: discontinuidad y similitud, en adelante se presenta un resumen de lo descrito por La Serna, N. y Román, U. (2009) la cual cita a Gonzales R. y Woods R. (1993) y Mazo, Q y Boquete V, (1996).

Segmentación basada en la discontinuidad y similitud

Dentro de este tipo se destacan: los métodos por línea divisoria de aguas; detección de bordes mediante la búsqueda de máximos en el gradiente de imagen o cruces por cero en la segunda derivada de la imagen; filtros en los que se optimiza una función que considera la exactitud en la posición del borde y la cantidad de bordes detectados; y la detección de regiones mediante agrupación de píxeles vecinos con características similares (Región Growing).

Los métodos de extracción de bordes de una imagen, se basan en la diferencia que experimenta una característica en dos regiones adyacentes y que indica la existencia de un borde. Se utilizan derivadas de primer y segundo orden.

Derivada de primer orden, el operador gradiente

El operador gradiente es aplicado en una de las técnicas más comunes para detectar bordes de dos dimensiones (2D). El gradiente de una imagen es una función $f(x, y)$ que se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$G(F(x, y)) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dF/dx \\ dF/dy \end{bmatrix}$$

El operador gradiente G alcanza su máximo valor en la dirección en que la variación es máxima, por lo tanto, se define la ecuación siguiente:

Ecuación 2

$$G(F(x, y)) = \sqrt{[G_x(x, y)]^2 + [G_y(x, y)]^2}$$

Es práctica común aproximar el gradiente mediante los valores absolutos, con el fin de conseguir un procesamiento más rápido que costa de un error despreciable, y la expresión se debe aproximar a la siguiente ecuación:

Ecuación 3

$$G(F(x, y)) = |G_x(x, y)| + |G_y(x, y)|$$

A partir de las ecuaciones anteriores se deduce el cálculo del gradiente de una imagen que se basa en la obtención de las derivadas parciales dF/dx y dF/dy en cada posición de pixel. Las derivadas de primer orden permiten encontrar lugares en una imagen en donde la intensidad que cambia rápidamente es mayor en magnitud que un umbral especificado.

El siguiente comando permite obtener la detección de bordes utilizando MATLAB®

i) `I = imread ('C:\Documents and Settings \ exclam.gif');`

ii) `[g, t] = Edge(I);` en donde el umbral $t = 0.2187$

Derivada de segundo orden, el operador Laplaciano

El Laplaciano de una función bidimensional $f(x, y)$ es una derivada de segundo orden definida por la ecuación:

Ecuación 4

$$\Delta^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2}$$

Varias son las técnicas que detectan discontinuidad de intensidad, que deberían dar como resultado píxeles que estuvieran en la frontera entre un objeto y su fondo, sin embargo, en la práctica, este conjunto de píxeles rara vez caracterizan una frontera completamente debido al ruido, interrupciones en la frontera debido a la iluminación no uniforme y otros efectos que introducen discontinuidades de intensidad. Por ello, los algoritmos de detección de bordes están seguidos por una unión y otros procedimientos de detección de frontera diseñados para reunir a los píxeles del borde en un conjunto con significado de fronteras de objeto. Según lo descrito por La Serna, N. y Román, U. (2009), algunas técnicas que persiguen este fin son:

Procesamiento local: la cual consiste en analizar un entorno de vecindad sobre los puntos (x, y) de una imagen en los que haya sido llevado un proceso de detección de borde, de forma que estos puntos se unen formando una frontera común.

Procesamiento global (Transformación de Hough): originalmente diseñado para detectar líneas y curvas, utilizando ecuaciones analíticas conocidas de bordes de objetos. La transformación Hough, en general, detecta bordes de objetos aun cuando las expresiones analíticas de los bordes son desconocidas. De manera intuitiva, este método consiste en calcular el gradiente de una imagen, luego crear un campo de acumulación en función de los parámetros de los resultados que se buscan. La idea básica de este método se basa en la detección de líneas rectas, por ello el objetivo de la transformación de Hough es encontrar puntos alineados en la imagen. De esta manera, se permite detectar bordes de imágenes que no sean líneas, círculos o elipses, pero para alcanzar la segmentación se requiere una especificación completa de la forma exacta del objeto en la imagen.

Segmentación utilizando umbralización

Es uno de los métodos más importantes de la segmentación de imágenes. El umbral se define como “una función que convierte una imagen con diferentes tonalidades en una imagen en blanco y negro” (La Serna, N. y Román, U. 2009). Si la imagen original es $f(x, y)$, la imagen umbralizada será $g(x, y)$ y se fija el umbral $U(0 < U < 225)$, la operación de umbralizado se define como la ecuación siguiente:

Ecuación 5

$$\begin{aligned} g(x, y) &= 255 && \text{si } f(x, y) > \text{umbral} \\ g(x, y) &= 0 && \text{si } f(x, y) \leq \text{umbral} \end{aligned}$$

Se selecciona un umbral que permita agrupar los pixeles de una imagen pertenecientes a los diversos objetos de la misma imagen diferenciándolos del fondo. De esta manera la segmentación se basa en la elección de uno o varios umbrales que agrupan los puntos con características similares en función a sus niveles de gris.

El umbral es definido según Gonzales R. y Woods R. (1993), de acuerdo a la siguiente ecuación:

Ecuación 6

$$T = T [x, y, p(x, y), f(x, y)]$$

Donde $f(x, y)$ es la intensidad o nivel de gris del punto (x, y) , así $p(x, y)$ representa alguna propiedad local medida en un entorno de vecindad de este punto. La imagen obtenida se define con la siguiente ecuación:

Ecuación 7

$$\begin{aligned} g(x, y) &= 1 && \text{si } f(x, y) > T \\ & && \text{si } f(x, y) \leq T \end{aligned}$$

De este modo los pixeles marcados con 1 corresponden a objetos, mientras que los pixeles marcados con 0 corresponden al fondo.

Segmentación orientada a regiones

Se utilizan propiedades espaciales de una imagen para segmentarla por regiones, es decir, la imagen es dividida en regiones conexas, en donde cada región tiene propiedades distintas que la diferencian de otras. Se trata de extraer los objetos de una imagen, las que pueden ser procesadas de manera independiente. Las técnicas más utilizadas para la segmentación por regiones son: a) crecimiento de regiones, y b) división y fusión.

Crecimiento de regiones. – se refiere al agrupamiento de píxeles adyacentes que presentan características similares. Se parte de un conjunto de grupos que hace crecer las regiones añadiendo los que tengan propiedades similares de intensidad, textura, color, etc.

División y fusión de regiones. – se divide la imagen arbitrariamente, posteriormente, dependiendo el criterio de segmentación, las regiones adyacentes son fusionadas si tienen propiedades similares como niveles de gris similares, o son divididos sino comparten las mismas propiedades como variaciones importantes de gris. Finalmente, la imagen queda segmentada en regiones homogéneas.

Importancia de la segmentación

Algunas de las tareas fundamentales del procesamiento digital de imágenes son: 1) Mejoramiento de una imagen digital con fines de interpretación, y 2) Toma de decisiones de manera automática de acuerdo al contenido de la imagen digital.

Las técnicas de procesamiento y análisis de imágenes digitales en color, originalmente se generalizaban al uso de imágenes a blanco y negro (llamadas monocromáticas); este proceso consistía en transformación de la imagen de color del sistema RGB al sistema YIQ. Una vez realizada la transformación a blanco y negro esta se devolvía a colores RGB y se obtenían resultados (Báez J. *et al.* 2004).

Diversas son las aplicaciones que se han desarrollado utilizando técnicas del procesamiento digital de imágenes. Las pioneras son las aplicaciones a programas espaciales. En medicina y Biología los procedimientos informatizados realzan el contraste o codifican la intensidad del color. Los Geógrafos utilizan la misma técnica para estudiar los patrones de polución a partir de imágenes aéreas o satelitales. En arqueología sirve para recuperar imágenes costosas, en física y campos afines, las técnicas realzan las imágenes de experimentos como los que emplean plasmas de alta energía y la microscopía de un electrón, igualmente es utilizado en astronomía, medicina nuclear y en aplicaciones industriales. (La Serna, N. y Román, U. 2009).

Aplicaciones de la segmentación de imágenes digitales

Por su parte, en el campo de la industrialización de alimentos los trabajos de Padrón-Pereira, C. (2009), muestran la metodología utilizada para la obtención de similitudes y diferencias en las imágenes segmentadas para crear un estándar entre los tonos de color de los alimentos procesados, esto con la finalidad de cumplir íntegramente los estándares requeridos para la venta industrial de alimentos.

En el campo de la geodesia, Ortiz F., (2002), muestra cómo la segmentación de imágenes digitales ayuda a realizar a la reconstrucción geodésica, mejorando los métodos ya existentes utilizando ordenación vectorial, basado en la eliminación de brillo de las imágenes y la atenuación del ruido de las mismas, basándose en sistemas de color HGV y HSI.

Propiedades del color

Un aspecto importante de la teoría del color es saber la diferencia entre el color luz (el que proviene de una fuente luminosa) y el color pigmento o color materia (óleo, témpera, lápices de color, etcétera).

El color es definido como “el fenómeno visual, que permite distinguir entre los elementos que se observan y clasifican” (Martínez, F. 2001).

Según lo descrito por De los Santos, A., (2010), Los colores aditivos son, entre otros, los que utilizan las pantallas de un ordenador que emplea puntos de color rojo, verde y azul (RGB por sus siglas en inglés), la suma de los tres colores es blanco y la ausencia de todos es el negro.

Modelos RGB

El color juega un papel importante en la determinación de diversas propiedades. El color dado en una imagen digital, se debe a un sistema de formación electrónica. Se puede producir al escanear una fuente análoga, como pudiera ser una fotografía usando un digitalizador de tipo CCD como lo es una cámara digital, en cualquier caso, la imagen obtenida tiene composiciones de pixel a pixel en dos dimensiones.

Dada esta característica de una imagen resultante, los dispositivos electrónicos de salida realizan una interpretación que es distinta, describiendo así del sistema de dos dimensiones a uno de tres que describe el color, esto según lo afirma Martínez, F. (2001).

Tres son los valores que pueden representar un color con gran aproximación al analizar una imagen digital, esto se debe a la respuesta de tres diferentes sensores o fotorreceptores en la salida de una cámara digital, las cuales responden a una función de sensibilidad espectral y la distribución de la luz en el fotorreceptor; estas respuestas originan curvas las cuales tienen picos en diferentes partes del aspecto visible total, ya sea en las regiones de longitud de onda larga, mediano y corta. Por tanto, la respuesta que observamos es lo que conocemos como rojo, verde y azul (modelo RGB). (Conde-Acevedo J. y Báez-Rojas JJ. 2000). La relación de los colores primarios que conforman el modelo RGB se muestra en la figura 2.

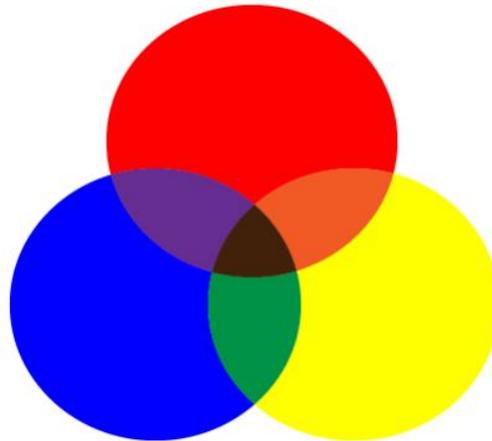


Figura 2. Modelo de color RGB. Tomado de: Conde-Acevedo J. y Báez-Rojas JJ. (2000).

Un modelo RGB está basado en un modelo triestímulo, en el cual, el color aparece especificado por cantidades positivas de rojo, verde y azul. El rango en cada coordenada o componente cromático RGB suele ser (0,1), aunque en multimedia, o sea, en imágenes digitales, se entiende en el intervalo (0,255), la figura 3 muestra la configuración de rango de cada color con respecto al modelo RGB.

Modelo RGB

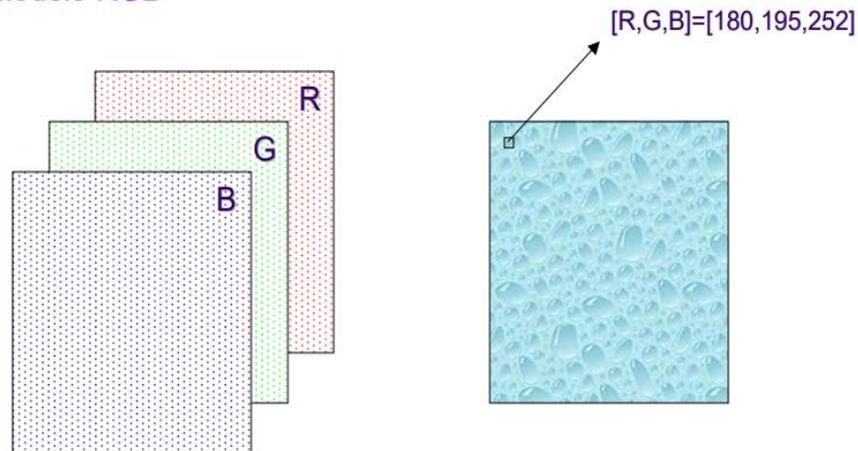


Figura 3. Ejemplo de la configuración del Modelo de color RGB. Tomado de: Conde-Acevedo J. y Báez-Rojas JJ. (2000)

El sistema RGB resulta atractivo por la gran aceptación, dado que en la mayoría de las cámaras en color lo utilizan y, por otro lado, porque representan muy bien la

tricromaticidad, por tanto, el procesamiento de imágenes de tipo RGB permite extraer formas muy detalladas de los atributos que la componen. (Martínez, F. 2011).

Este es un modelo de color que designa a cada color rojo, verde o azul un valor, de manera que el valor de 0, por ejemplo, indica que no intervine en la mezcla. Aunque el intervalo de colores pudiera ser cualquiera, es frecuente que para cada color primario se le codifique con un byte (8 Bits). De esta manera, la intensidad de cada componente se mide en una escala que va de 0 a 255. De esta manera, por ejemplo, el color rojo se obtiene con (255, 0, 0), el verde con (0, 255, 0) y el azul con (0, 0, 255). (Benimelli, E. 2011). Esto se sintetiza y muestra en la figura 3.

Rojo	#ff0000	El canal de rojo está al máximo y los otros dos al mínimo
Verde	#00ff00	El canal del verde está al máximo y los otros dos al mínimo
Azul	#0000ff	El canal del azul está al máximo y los otros dos al mínimo

Figura 4. Codificación de la intensidad de valores de RGB en Bites. Tomado de: Benimelli, E. (2011).

El modelo de color RGB se representa mediante un cubo, donde los primarios de cada dispositivo son distintos, aunque en general parecidos. Para unos primarios concretos de un dispositivo, podemos ver todos los colores reproducibles como puntos en un cubo tridimensional de lado unidad. A este espacio de color se le llama espacio RGB y se muestra en la siguiente figura.

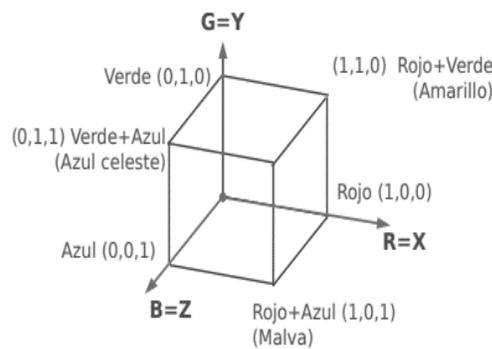


Figura 5. Espacio de color RGB. Tomado de Ureña, C. (2010).

Modelo HSV

Es un modelo basado en coordenadas polares y no cartesianas. El espacio RGB tiene el inconveniente de ser un poco intuitivo para un usuario cuando tiene que especificar un color. Para solventar ese problema se inventó el espacio HSV, donde cada punto se corresponde a uno del espacio RGB, por tanto, es un espacio de color relativo a los primarios de un dispositivo, al igual que el RGB, cada color del espacio está definido por un tono (Hue), una saturación (Saturation) y un brillo (Value) (Ureña, C. 2010).

Tono o matiz (H): Se corresponde con el tono de color (rojos, verdes, azules, etc.). Es un ángulo, en grados entre 0 y 360.

Saturación (S): indica el nivel de pureza del color, y varía entre 0 para todos los grises, (incluyendo al negro y blanco), y 1 para todos los colores cuyas componentes RGB tienen algún cero (máxima pureza).

Brillo (V): representa la luminosidad del color y varía entre 0 para el negro y 1 para todos los colores tales que alguna de sus componentes RGB es 1 (no pueden hacerse más brillantes).

Correspondencia entre RGB y HSV

El espacio HSV puede verse como una deformación del RGB. Las coordenadas HSV se interpretan como coordenadas cilíndricas en un cono, la figura 6 siguiente muestra el proceso de deformación del cubo RGB al cilindro HSV

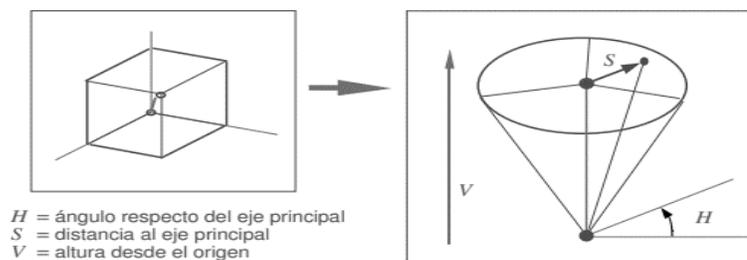


Figura 6. Transformación del espacio de color RGB al HSV. Tomado de Ureña, C. (2010).

Como se mencionó con anterioridad, los modelos de color RGB y HSV corresponden a un cubo y a un cono respectivamente, según se menciona en Ureña, C. (2010); las tres caras del cubo RGB se corresponden con un hexágono, que a su vez se modifica hasta un círculo, como se muestra en la siguiente figura 7.

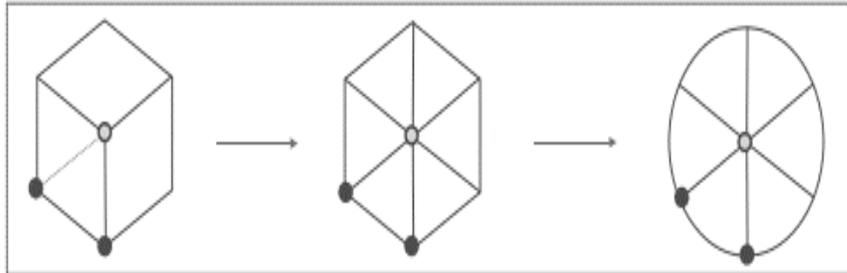


Figura 7. Correspondencia entre modelos RGB y HSV. Tomada de Ureña, C. (2010)

En cada sector hay una correspondencia entre puntos: Los puntos en el interior de alguna de las caras delanteras de un subcubo incluido en el cubo original se corresponden con círculos menores con valor V (altura) el cual es la altura más baja, el valor V es igual al máximo de R , G y B . Esta correspondencia se muestra en las Figuras 8 y 9 respectivamente.

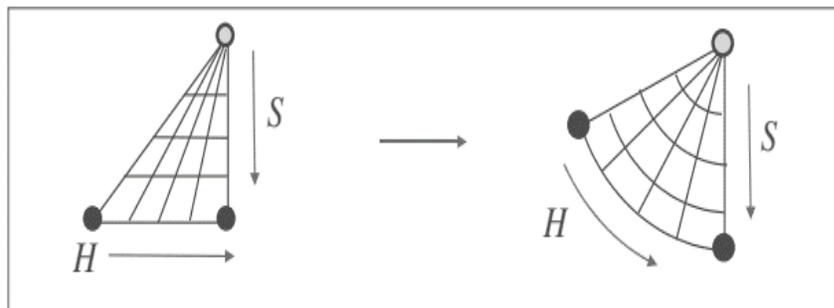


Figura 8. Correspondencia entre sectores del modelo HSV. Se muestra la dirección entre valores de H , S y V . Tomado de Ureña, C. (2010).

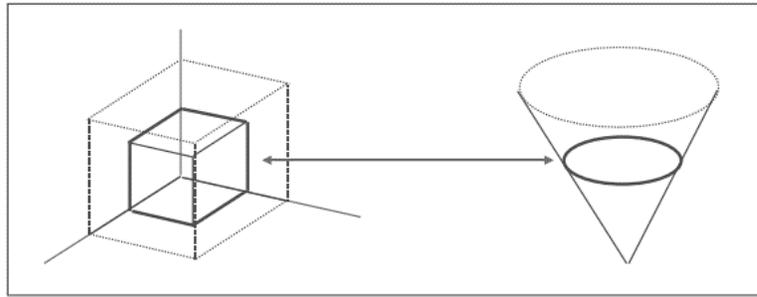


Figura 9. Correspondencia entre el subcubo del modelo RGB y el cono del modelo HSV. Se muestra la relación entre el subcubo RGB con referencia al cono HSV. Tomado de Ureña, C. (2010).

Otra forma de representar el modelo de color HSV es que creó Alberto Henry Munsell, quien muestra una manera “racional y ordenada para describir el color” este sistema es conocido como el Árbol de Munsell, y basados en este sistema están diseñadas las interfaces de software para ilustración, pintura, diseño, fotografía, video y todo lo que tenga que ver con color digital (De los Santos 2010). Este modelo consta al igual que el modelo original de tres elementos los cuales son:

- Hue: que equivale al tono o matiz
- Value: luminosidad
- Chroma: saturación

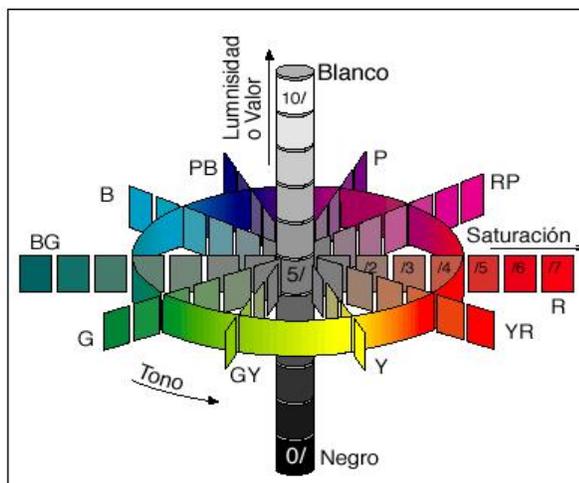


Figura 10. Esquema del árbol de Munsell. Tomada de: De los Santos, A. (2010).

A continuación, se muestra la descripción de cada una de los componentes del color con el modelo HSV tal como lo menciona De los Santos, A. (2010).

Matiz o tono (H)

Es la cualidad por la que se diferencia un color, es un atributo asociado con la longitud de onda dominante en la mezcla de ondas totales; este atributo permite distinguir el rojo del azul y se refiere al recorrido que hace un tono hacia el otro con respecto al círculo cromático.

Saturación o brillo (S)

Este concepto representa la intensidad de un color, se relaciona con el ancho de banda de la luz que está más visualizada, esta propiedad permite diferenciar un color intenso de uno pálido. También puede ser definido por la cantidad de grises que contiene un color: más gris menos saturación.

Valor o luminosidad (V)

Es el atributo que se refiere a cuan claro u oscuro parece un color y se refiere a la cantidad de luz percibida. Los colores con valor alto corresponden a los claros, pues reflejan más luz y los de valor bajo (oscuros) absorben más luz.

Otros modelos de color

Los espacios de color proporcionan un método para especificar, ordenar y manipular colores. Estas representaciones se corresponden con n-dimensional ordenaciones de las sensaciones de color (vectores de n componentes). Los colores se representan mediante puntos en estos espacios. Existen numerosos espacios de color en la actualidad. La gran mayoría de ellos se han desarrollado para aplicaciones específicas, aunque todos parten de un mismo concepto: la teoría tricromática de colores primarios rojo, verde y azul Ortiz, F. (2002).

Modelo CMYK

A diferencia de RGB, que es un modelo de color aditivo, CMYK es un modelo de color sustractivo. Normalmente utilizado en la impresión, CMYK asume que el fondo es blanco, por tanto, le resta brillo del fondo a los colores cian, magenta, amarillo y negro.

CMYK, produce colores visibles gracias al proceso de mediar el tono, por lo que cada color se le asigna un nivel de saturación. Este modelo depende del dispositivo y no existen fórmulas para convertir el color CMYK a RGB y viceversa, por lo que la conversión suele depender de los sistemas de la gestión del color en sí. Barberá J. (s/a).

Por otra parte, en Ortiz, F. (2002), se muestra cómo obtener la transformación lineal de modelos RGB a MCY, se especifica que los componentes de ambos modelos se distribuyen en rangos [0,1]. La ecuación utilizada para ello es la siguiente:

Ecuación 8

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Esta muestra que la luz reflejada por una superficie amarilla pura (Y=1, C=0, M=0) no contiene luz azul, en este caso, B=0, G=1 y R=1. De este modo un pigmento magenta puro no refleja la luz verde y un cian la luz roja.

Modelo XYZ

La Comisión Internacional para la Iluminación, CIE (Por sus siglas en francés), en el año 1931, propuso este modelo como un estándar de medida. El modelo CIE derivó de una serie de experimentos realizados por David W. Wright y John Guild. Este modelo se basa en los tres colores primarios básicos, rojo, azul y verde dando colores triestímulo X, Y y Z respectivamente. Dado que el ojo humano tiene tres tipos de conos que corresponden a diferentes rangos de longitudes de onda, este modelo posee una

representación de todos los colores visibles en una figura tridimensional. Calvo, I. (2018).

El modelo cromático XYZ es independiente de dispositivos y se emplea en aplicaciones en la que las representaciones del color no dependen de la naturaleza del equipo o hardware, por ejemplo, en los sistemas industriales de medición de color. Asimismo, el modelo XYZ es empleados para la especificación normalizada del color y en los cálculos colorimétricos. El papel del modelo XYZ en procesamiento de imágenes es realmente escaso, si bien, será requerido como espacio intermedio para realizar transformaciones del sistema RGB a otras coordenadas cromáticas Ortiz, F. (2002).

Modelo HSI

En este modelo los colores se distinguen por su tono, intensidad y saturación. El tono está asociado con la longitud de onda dominante en una mezcla de ondas luminosas, esto es el color dominante tal y como se percibe; la intensidad representa la iluminación que un objeto refleja con respecto a la luz y, por último, la saturación se refiere a la cantidad de luz blanca mezclada al color dominante Báez J. y Alonso M. (2008).

Los modelos HSI, HLS, HSV y sus variantes, codifican los atributos de luminancia o intensidad, saturación y matiz. La familia de modelos HSI se derivan del modelo RGB a partir de una transformación de coordenadas, con esta transformación el cubo RGB pasa a tener forma cilíndrica, de modo que la saturación y el matiz cambian su posición en el sistema de coordenadas polar mientras que la intensidad es la distancia a lo largo del eje perpendicular al plano de coordenadas en sí Ortiz, F. (2002).

La familia de espacios HSI han demostrado su eficacia en multitud de aplicaciones de procesamiento de imágenes. Ortiz, F. (2002) hace referencia a lo descrito por Gagliardi, (1985) argumentando que el empleo del matiz y la saturación en el control de la calidad de vegetales es eficiente, por otra parte, menciona a Kay, (1992) el cual presenta una variación del proceso para la clasificación de frutas por su componente

de matiz. El efecto indeseable de los brillos y reflejos en las imágenes también puede evitarse con el uso de la familia de espacios HSI.

Conversión entre modelos de color

Para realizar la transformación entre un modelo de color y otro es necesario acudir a transformaciones y operaciones matemáticas que llevan de un modelo de color a otro. A continuación, se muestra la manera de pasar de un modelo de color a otro.

Conversión RGB a HSV

Como se mencionó anteriormente, el modelo no HSV no tiene una transformación lineal a RGB por lo que se recurren a las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones para estimar Hue, Saturación y Valor según lo descrito por González R. y Woods R. (1996):

$$H = \begin{cases} \text{No definido,} & \text{si } MAX = MIN \\ 60^\circ \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 0^\circ, & \text{si } MAX = R \\ & \text{y } G \geq R \\ 60^\circ \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360^\circ, & \text{si } MAX = R \\ & \text{y } G < R \\ 60^\circ \times \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120^\circ, & \text{si } MAX = G \\ 60^\circ \times \frac{R - G}{MAX - MIN}, & \text{si } MAX = B \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{si } MAX = 0 \\ 1 - \frac{MIN}{MAX}, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$V = MAX$$

Por su parte, González R. y Woods R. (1996), muestran una manera lineal de convertir de modelos RGB a HSV, estas ecuaciones se muestran a continuación:

Ecuación 9, 10, 11 y 12

$$V = \frac{1}{3} (R + G + B)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} (\min(R, G, B))$$

$$H = \begin{cases} \theta & \text{si } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{si } B > G \end{cases}$$

Donde $\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{1/2[(R-G)+(R-B)]}{[(R-G)^2+(R-B)(G-B)]^{1/2}} \right\}$

Saturación \approx radio, hue (matiz) \approx ángulo

González R. y Woods R. (1996), presenta la transformación inversa entre HSV a RGB, dados los valores en $[0,1]$, renormalizando H al intervalo angular $[0^\circ, 360^\circ]$. Se obtienen tres sectores los cuales se muestran a continuación:

Sector RG ($0^\circ \leq H \leq 120^\circ$):

Ecuación 13, 14 y 15

$$B = I(1 - S)$$

$$R = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right]$$

$$G = 1 - (R + B)$$

Sector GB ($120^\circ \leq H \leq 240^\circ$):

Ecuaciones 16, 17, 18 y 19

$$H' = H - 120^\circ$$

$$R = I(1 - S)$$

$$G = I \left[1 + \frac{S \cos H'}{\cos(60^\circ - H')} \right]$$

$$B = 1 - (R + G)$$

Sector BR ($240^\circ \leq H \leq 360^\circ$):

Ecuaciones 20, 21, 22 y 23

$$H' = H - 240^\circ$$

$$G = I(1 - S)$$

$$B = I \left[1 + \frac{S \cos H'}{\cos(60^\circ - H')} \right]$$

$$R = 1 - (G + B)$$

Conversión entre RGB y XYZ

Conocer las coordenadas de los tres primarios permite convertir desde RGB hacia XYZ, partiendo del supuesto de que en un pixel se mezclan los primarios en cantidades R, G y B, es decir, se muestra el color (r, g, b) . En estas condiciones, las coordenadas XYZ del color obtenido son (X, Y, Z) , obtenidas como la mezcla ponderada de cada primario, es decir

$$X = rX_r + gX_g + bX_b$$

$$Y = rY_r + gY_g + bY_b$$

$$Z = rZ_r + gZ_g + bZ_b$$

Las anteriores igualdades pueden expresarse matricialmente, como se muestra a continuación:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

O, lo que es lo mismo,

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \text{ donde } M = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix}$$

La transformación inversa (de XYZ a RGB) puede hacerse usando la matriz inversa de M, es decir, la matriz M^{-1} (Ureña, C. 2010).

Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes es una herramienta ampliamente utilizada en la automatización de procesos industriales, debido a que presenta confiabilidad, eficacia y rapidez en el procesamiento, Cáceres C., *et al.*, (2014) mencionan que el

procesamiento de imágenes con fines de reconocimiento de plagas y morfología de las plantas se ha discutido en diversos trabajos como, por ejemplo, los de Yam *et al.*, (2009) en donde se propone un método para la detección de plagas y el suministro automatizado de plaguicidas en invernaderos.

Diversos son los estudios que muestran la importancia que puede tener el análisis en una imagen digital en el campo de la agricultura, ya sea en el fruto como lo mencionado por Padrón-Pereira, C., (2009; 2013), Castro J., *et al.*, (2012), o en las plagas y enfermedades presentes como lo menciona Guzmán, O. *et al.*, (2003).

Detección de enfermedades utilizando imágenes digitales

El procesamiento digital de imágenes equivale a realizar operaciones sobre un conjunto de datos obtenidos de las mismas imágenes, esto con el fin de mejorar la imagen para una aplicación en particular o para extraer información útil. Los trabajos más recientes sobre este tema están relacionados con la segmentación de imágenes a color, análisis de textura, morfología matemática, estandarización de imágenes a color y localización de objetos Báez J. y Alonso M. (2008).

La identificación automática de enfermedades en plantas por inspección visual puede ser de gran beneficio para aquellos usuarios que no conocen o tienen poca información sobre el cultivo que trabajan. La importancia de poder conocer y controlar plagas en cultivos de interés agronómico radica en que se puedan aplicar tratamientos y protección temprana de estos cultivos si son detectadas las plagas y enfermedades en una etapa temprana, así como sus agentes causales Velázquez-López N., *et al.*, (2011).

En la agricultura se han desarrollado muchas aplicaciones usando visión por computadora. Los sistemas de visión por computadora no sólo reconocen el tamaño, forma, color y textura de los objetos, sino que también proporcionan atributos numéricos de los objetos o escenarios que examinan Yun-Ren, *et al.*, (2002), citado por Velázquez-López N., *et al.*, (2011).

Unas de las ventajas del uso de la tecnología de detección por imágenes, es que puede ser bastante precisa, no destructiva y con resultados consistentes Chen Y., *et al.*, (2002). Por otra parte, los sistemas de visión artificial se utilizan para desarrollar diversas aplicaciones agrícolas, de esta manera se conocen condiciones del suelo, cobertura de residuos, sanidad vegetal, identificación de especies, densidad de población y el tamaño de la planta. Hemming y Rath, (2011) citado por Velázquez-López N., *et al.* (2011).

Hay diversos estudios como los mostrados por Velázquez-López N., *et al.*, (2011), donde se describen métodos basados en imágenes digitales que identifican las enfermedades en ese caso de cenicilla mediante la extracción de los colores de las regiones de la planta y la enfermedad a través del espacio de color HSV.

Por otro lado, Nandi C. *et al.*, (2014) trabajó con el procesamiento de las imágenes tomadas automáticamente a frutos de mango para clasificar estos de acuerdo a su grado de madurez. Concluyendo en la importancia de la automatización en la clasificación y detección detallada de la calidad del fruto. Un trabajo similar es el realizado por Padrón-Pereira C., (2013), en donde se mide el diámetro de los frutos de mandarina durante el desarrollo del árbol para construir curvas de crecimiento, relacionados a la nutrición y factores biológicos de desarrollo.

Por su parte, Guzmán P., *et al.*, 2003. Utilizan el programa MATLAB®, en su versión 5.3 para realizar un programa que analiza imágenes para medir la intensidad de la mancha de hierro en el café, la cual es provocada por *Cercospora coffeicola*, lo que permitió conocer con mayor precisión y rapidez el área foliar de las plantas y el área de afectación, permitiendo así tener resultados más confiables y que son reproducibles en otras plagas y en otras especies de plantas.

Cultivo de pepino

Dentro de la familia de las cucurbitáceas, existen especies importantes para el hombre, dado que son fuente de alimento, fibra y algunos objetos domésticos. Existen alrededor

de 90 géneros y 750 especies de cucurbitáceas divididas entre el nuevo y el viejo continente. Según se describe en Hernández, C. (2011); actualmente se cultivan seis géneros y 12 especies. Para el caso de México, las principales cucurbitáceas cultivadas son la calabaza (*Cucurbita spp.*), melón (*Cucumis melo* L.), pepino (*Cucumis sativus* L.) y sandía (*Citrullus lanatus* Thunb.).

El pepino *Cucumis sativus* L. es una planta de interés agronómico, de origen asiático, cuya parte comestible es el fruto inmaduro. Tiene mucha demanda en todo el mundo, esto debido a sus cualidades refrescantes, ya que no tiene mucho valor alimenticio debido a que el mayor porcentaje de composición es agua. Dentro de la familia de las cucurbitáceas, ocupa el cuarto lugar en importancia, debido a la superficie sembrada de éste. Se le atribuyen propiedades medicinales como diurético, tónico y vermífugo; además es utilizado en la industria farmacéutica y de cosméticos CONABIO, (2011).

La mayor producción de pepino que se comercializa dentro de México según la SAGARPA (2015), proviene de diez entidades: Baja California, Baja California Sur, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla, Sinaloa, Sonora y Yucatán.

Es la misma Secretaría la que realizó estudios de los costos de producción en 24 ciudades en el mes de junio del año 2015. Obteniendo los siguientes datos

Tabla 1. Datos de precios de la producción de pepino al 2015

Concepto	Cantidad	Entidad federativa
Precio al productor más alto (\$/kg)	\$10.20	Baja California
Precio al productor más bajo (\$/kg)	\$1.97	Guanajuato
Precio más alto al mayoreo (\$/kg)	\$11.05	Quintana Roo
Precio más bajo al mayoreo (\$/kg)	\$3.87	Aguascalientes
Precio más alto al consumidor (\$/kg)	\$15.75	Quintana Roo
Precio más bajo al consumidor (\$/kg)	\$7.89	Veracruz

Realización propia con datos de la SAGARPA, 2015.

En cuanto a los datos proporcionados por la Secretaría se menciona que la producción de pepino es mayor en el ciclo otoño-invierno con un 68%, mientras que el restante se genera en el ciclo primavera-verano. Por otro lado, entre los años 2012 – 2014 seis estados son los que generan 80% en el ámbito nacional, donde destacan Sinaloa con un 40% y Michoacán con un 14% de la producción nacional para ese periodo. Para el país el pepino se recolecta todo el año, pero en los meses de febrero, marzo y abril, se obtiene un 44 por ciento del total.

Características biológicas del pepino

Reino: Metaphytha

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliosida

Orden: Violales

Familia: Cucurbitaceae

Género: *Cucumis* L.

Especie: *sativus* L.

Esta especie se cultiva principalmente en zonas de climas cálidos, desde el nivel del mar hasta los 1500 (-2000) msnm. Se usa en agroecosistemas, cultivos y huertos familiares.

Suele cultivarse en cualquier tipo de suelo de estructura suelta, bien drenado y con suficiente materia orgánica. Es una planta medianamente tolerante a la salinidad, el pH óptimo de desarrollo oscila entre 5,5 y 7 CONABIO, (2011).

Plagas del pepino

La producción de pepino en condiciones de invernadero tiene la ventaja de que la aparición de plagas nocivas, es menor a la establecida en siembras bajo cielo abierto INIFAP, (2013).

El pepino puede ser afectado por diferentes tipos de organismos desde los microscópicos a los macroscópicos, en este caso, se prestará especial atención a los organismos microscópicos, sus causas y sus características en el daño a la planta.

Entre los principales insectos que atacan al pepino están: gusanos cortadores: cuerudos, tierreros, hacheros y cortadores (*Feltia subterranea*, *Agrotis* sp., *Prodenia* sp.).

Los daños en general de los insectos son afectaciones a las partes vegetativas de la planta, por lo que la debilitan, limitan el área foliar y algunos perforan el fruto. Sin embargo, hay otros insectos que además de las afectaciones directas es que son vectores de virus y hongos según se menciona en López C. 2003.

Pseudoperonospora cubensis

Dominio: Eucariota

Reino: Sin Clasificar

Superphyllum: Heterokonta

Clase: Oomicetos

Orden: Peronosporales

Familia: Peronosporaceae

Género: *Pseudoperonospora*

Especie: *P. cubensis*

P. cubensis se reportó inicialmente en Cuba en el año 1868, y veinte años después en Japón; actualmente está presente en todos los países donde se cultivan y comercializan las cucurbitáceas Ruíz-Sánchez, E. *et al.*, (2008).

Este hongo es un parásito o biotrofia obligado, lo que significa que requiere un tejido para sobrevivir y reproducirse. Es especialmente susceptible a las heladas, por lo que hiberna. Las esporas se dispersan por el viento, y los síntomas de esta enfermedad

aparece entre los 4 y los 12 días de iniciada la infección. El patógeno prospera en condiciones frías y húmedas, sin embargo, puede hacerlo en una amplia gama de condiciones. La esporulación se da a la temperatura óptima de 15°C con 6 a 12 horas de humedad presente, a menudo en forma de rocío, regularmente la producción de esporas se da por la noche, pues la temperatura diurna no es favorable para este fin. Las oosporas de *P. cubensis* son raras y su papel en la naturaleza es desconocido. Cohen Y., *et al.* (2014).

El mildiú vellosa, causado por *Pseudoperonospora cubensis* ha causado estragos severos en la producción de cucurbitáceas en todo el mundo Thomas, (1982) citado por Ruíz-Sánchez *et al.*, (2008).

Una de las características más importantes de este hongo es su capacidad de infectar un amplio rango de hospedantes, afecta a 40 especies de aproximadamente 20 géneros de la familia cucurbitácea, sobresaliendo por su importancia económica, la sandía, el pepino y la calabaza (Shetty, N. *et al.*, 2002).

Este hongo está ampliamente extendido por todo el mundo y ocasiona con frecuencia daños muy importantes. Sus exigencias climáticas lo llevaron a colonizar inicialmente las regiones tropicales y subtropicales; en la actualidad se encuentra en latitudes más altas. Puede afectar a numerosas cucurbitáceas, pero en cada país las cepas encontradas tienen aptitudes particulares Blancard D., *et al.*, (2000).

Puede producir oosporas, pero estas se han observado raramente como para jugar un papel importante. Estas al parecer, pueden mantenerse sobre restos vegetales infectados. Cuando la humedad ambiental es del 100% y las temperaturas están entre 10 y 25°C numerosos conidióforos con numerosos conidios aparecen en el envés de las hojas (más raramente en el haz). Las esporas son dispersadas muy fácilmente por el viento, las corrientes de aire, y las salpicaduras y las escorrentías consecutivas a fuertes lluvias o riegos por aspersion. El viento cálido y húmedo asegura el transporte de las esporas a larga distancia. El mildiú se generaliza de una parcela específica a todas las adyacentes Blancard D., *et al.*, (2000).

Síntomas

Cuando las condiciones son favorables al desarrollo, el mildiu provoca la aparición de numerosas manchas primeramente aceitosas y luego amarillas en las hojas dejándolas necróticas, estas manchas son muy frecuentemente angulares, especialmente en el pepino. El limbo toma el aspecto de un verdadero mosaico en manchas que no deben ser confundidas con las provocadas por un virus.

Las hojas de pepino, especialmente en cultivo bajo abrigo, se cubren frecuentemente de una película de agua, permitiendo un desarrollo rápido del mildiu, en forma de anchas zonas manchadas que se desecan posteriormente como se muestra en la siguiente figura Blancard D., *et al.* (2000).



Figura 11. Aspecto de una hoja de pepino afectada por Mildiú. Blancard D., *et al.* (2000).

Los esporangios del hongo *P. cubensis* liberan esporas que se desplazan a través del agua mediante la utilización de sus flagelos. Cuando alcanzan la zona a infectar, germinan. La germinación se lleva a cabo cuando la temperatura oscila entre 16-22°C. Una vez infectada las hojas, el desarrollo se ve favorecido por alternancia de temperaturas cálidas durante el día (25°C) y la noche (15°C). Humedad relativa elevada (80-90%), rocíos nocturnos y nieblas matinales también favorecen su desarrollo. Por el contrario, temperaturas inferiores a 5°C o superiores a 35°C detienen el desarrollo del hongo Infoagro, (2018). Según se registra en López C. (2003); la enfermedad conocida como Mildiu lanoso (*Pseudoperonospora cubensis*) se inicia en

las hojas más viejas de la planta en forma de machas angulares amarillas, delimitadas por las venas de las mismas, las cuales con el tiempo se secan y el daño se extiende a las más jóvenes, una vez que las condiciones de humedad continúan favorables para el hongo, pueden llegar a destruir el cultivo; por otra parte, los frutos, afirma, no son atacados, pero sufren las consecuencias de la defoliación, por lo que quedan pequeños, mal formados o quemados por el Sol además de la reducción notable de la producción.

Control

Diversas biografías anuncian los tratamientos químicos utilizados para el control, por ejemplo, en lo mencionado por López C. (2003) que sugiere lo siguiente:

Azoxistrobina 14g/bomba de 4 galones.

Clorotalanilo 50cc/bomba de 4 galones.

Tebuconazole-triadimenol 25cc/bomba de 4 galones.

Infoagro, (2018); por su parte sugiere lo siguiente:

Control cultural. – Se debe llevar a cabo medidas, preventivas como culturales, que evitaren la incidencia del hongo, las medidas deben aplicarse en plantaciones que tengan antecedentes de esta enfermedad, lo sugerido es lo siguiente:

- Utilizar semillas y material vegetal sano
- No asociar cultivos dentro de la misma parcela
- Retirar y destruir los tejidos enfermos, así como los restos de poda. No abandonar cultivos al final del ciclo.
- Usar variedades resistentes, o tolerantes.
- Reducir la humedad ambiental. Utilizar el riego con la adecuada ventilación.
- Evitar presencia de agua libre en el cultivo. Por tanto, el riego por aspersión no es el más conveniente para evitar la aparición de esta enfermedad.

- Evitar el exceso de abono nitrogenado para que la cantidad de follaje en la planta no sea excesiva.

Control químico. – Éste debería iniciarse una vez que se observe la presencia de la enfermedad en los tejidos vegetales. Los fungicidas a elegirse deben aplicarse generosamente en el envés de las hojas (inclusive en las de la parte basal de la planta) y tallos.

Se sugiere priorizar en el tipo de control que no implique el uso de químicos, pues estos tienen un importante valor residual, lo que genera impacto ambiental negativo; por lo que en definitiva se deben usar lo menor posible, por lo que el adecuado uso de las medidas de prevención cobra importancia Infoagro, (2018).

Materiales y métodos

El presente trabajo de investigación se realizó en el municipio de Saltillo, estado de Coahuila de Zaragoza, México; al ser un trabajo de percepción de imágenes digitales, no se estableció un lugar único para la realización del mismo, más bien se trabajó con programas, técnicas y equipos de cómputo específicos los cuales se describen a continuación:

Los datos fueron procesados en el equipo de cómputo marca Gateway P5WS0, modelo NV57H14m, procesador Intel Core i5-2410M (2.30GHz); memoria RAM de 6GB. 64 bits x64-procesador.

La obtención de las imágenes se realizó mediante la búsqueda de estas en artículos científicos, páginas de internet y referencias bibliográficas donde se pudiera comprobar que se trataba del cultivo y la enfermedad de interés y cuyas imágenes fueran tomadas directamente de plantas con afectaciones por Mildiú. Para ello se eligieron 100 imágenes, las cuales se guardaron en la memoria interna del equipo de cómputo, una vez que se tenía la totalidad de las imágenes, se llevaron al programa Paint Versión "Newcastle" para Windows 10 home Single Language, para quitarles el fondo (ruido) dejando así sólo el área de la hoja, se eligió la hoja que apareciera en primer plano o tuviera mejor visibilidad en la fotografía, considerando las características tanto de la hoja sana como de las afectaciones por el Mildiú. Posteriormente se buscaron 20 imágenes que presentaran la enfermedad conocida como cenicilla, la cual es ocasionada por *Sphaerotheca fuliginea* Schlechtend.:Fr, Pollaci y 20 que no presentaran daños evidentes de ningún tipo.

Cada una de las imágenes se guardó en formato PNG (*Portable Network Graphics*), puesto que este permite almacenar imágenes en blanco y negro (a una profundidad de color de 16 bits por pixel) y en color real con una profundidad de color de 48 bits por píxel, así como imágenes utilizando una paleta de 256 colores esto según lo descrito por Villagómez, C. (2017), el uso de este formato es debido principalmente a que el programa MATLAB® aplica la transparencia a las imágenes solo si usan este formato (Fuente: <https://www.mathworks.com/help/MATLAB/ref/imread.html>).

La herramienta utilizada para realizar la segmentación de imágenes es MATLAB® de MathWorks; el cual es una herramienta utilizada para analizar y diseñar los sistemas y productos de transformación con un lenguaje basado en matrices para expresiones matemáticas de computadoras. Se utilizó la versión R2018a para Windows de 64 bit.

Metodología utilizada

1. La finalidad de este trabajo fue crear un programa utilizando MATLAB® Versión R2018a que permitiera segmentar imágenes digitales de hojas de pepino, a las cuales se les elimino, primeramente, el ruido (fondo); para posteriormente seleccionar valores de amarillo en HUE, utilizando las referencias bibliográficas que indican los rangos máximos y mínimos para este color.
2. Se definió el umbral de valores máximos y mínimos para amarillo que mostrara la afectación realizada por Mildiu. Esto gracias a la media de los valores máximos y mínimos obtenidos de las primeras 30 imágenes que fueron segmentadas.
3. Una vez obtenido el umbral se utilizó este rango para comprobar en las 70 imágenes restantes que realmente mostraran las afectaciones a la hoja provocadas por *P. cubensis*.
4. Se obtuvieron las imágenes que permitieran comparar entre la imagen original y la segmentada que el resultado correspondiera a las áreas que presentaban síntomas de afectación por Mildiú.
5. Se realizó la segmentación de 20 imágenes más que presentaran daño ocasionado por cenicilla (*S. fuliginea*) y con 20 que no presentaran daños por plagas o enfermedades, para comprobar que los rangos del umbral obtenidos solo segmentarían a la imagen en áreas dañadas por Mildiú de acuerdo al umbral para color amarillo que fue determinado.

MATLAB

MATLAB® es un programa interactivo para el cálculo numérico y tratamiento de datos, las cuales permiten tener diversas funcionalidades, contiene además paquetes especializados de procesamiento como el de tratamiento de imágenes.

Descripción de los Comandos Utilizados por MATLAB®

MATLAB® es un programa de tipo command-driven, es decir, que se introducen las órdenes describiéndolas después del símbolo `>>` (prompt), que aparece en la interfaz del usuario. Tal como se muestra en la siguiente imagen.

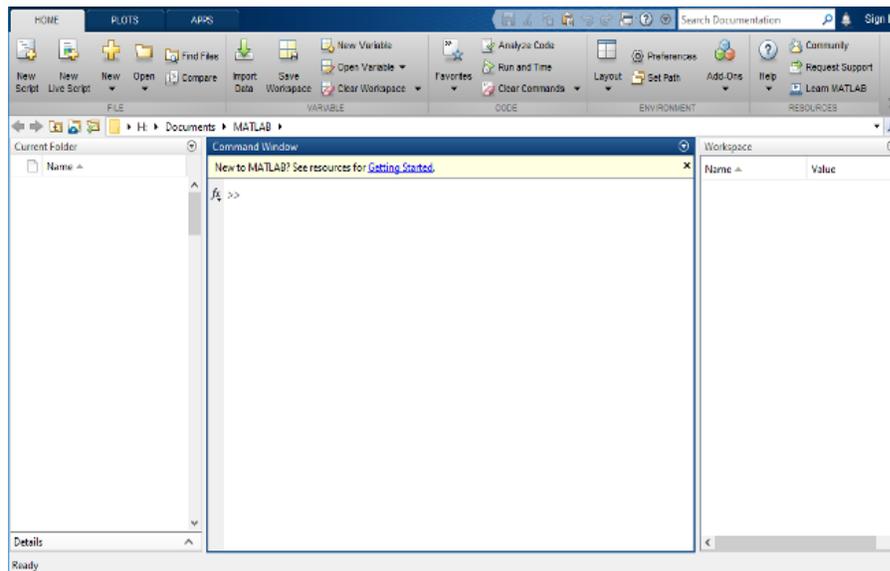


Figura 12. Aspecto inicial del programa MATLAB®.

Al trabajar en MATLAB®, se emiten comandos que crean variables y llaman funciones. Por ejemplo, para crear una variable denominada `a`, debe ingresar esta instrucción en la línea de comandos:

```
a = 1
```

MATLAB® agrega la variable al área de trabajo y muestra el resultado en la ventana de comandos.

```
a =
```

Particularidades del programa MATLAB® y sus comandos básicos

Este programa depende del contexto, es decir, que las letras en mayúsculas y minúsculas son diferentes, siendo así que: X es diferente de x.

La comilla sencilla ´ se emplea para ingresar texto en una función, como por ejemplo '1.png' indicando que es el nombre tal cual se encuentra guardado el archivo o salida deseada.

El signo igual = se emplea para asignar valor a una variable, por ejemplo $y=5$ (en la variable y se almacena el valor de 5).

El punto y coma ; al final de la instrucción se plantea para indicar a MATLAB® que realice el cálculo sin presentar en pantalla el procedimiento o el resultado.

Las operaciones o cálculos se asignan a las variables específicas siendo los símbolos típicos de suma +, resta -, división / y multiplicación *. Estas se evalúan por orden de prioridad: primero las potencias, después las multiplicaciones y divisiones y al final las sumas y restas. Un ejemplo es el siguiente:

```
>>10/2*4 ans = 20 >>10/(2*4) ans = 1.2500
```

Los componentes de un vector o matriz deben ir entre corchetes [] y las filas deben ir separadas por punto y coma.

Cualquier tipo de comentario o mensaje se escribe precedido por el carácter %. Ejemplo: %Así se escriben los comentarios o mensajes.

Comandos relacionados al Manejo de Imágenes

Algunos comandos utilizados en el procesamiento de imágenes digitales son los siguientes:

Rgb2hsv. - Convertir RGB a HSV

Figure. - Crea una nueva figura o redefine la figura actual.

Imshow. – Mostrar imagen.

Imread. – Leer imagen.

Imshow = Mostrar imagen

Toda la información anteriormente descrita fue tomada del sitio web de MATLAB® en el apartado de ayuda, disponible en: https://la.mathworks.com/support.html?s_tid=gn_supp

Programación utilizando MATLAB® R2018a

1. Se instala el programa MATLAB® según las especificaciones e instrucciones del servidor. Y se iniciará el programa.

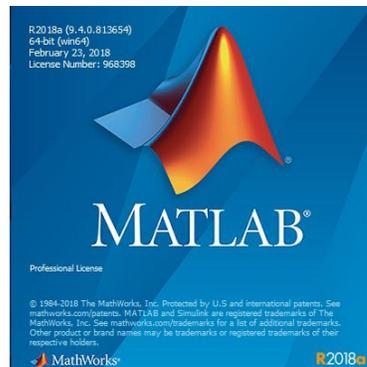


Figura 13. Icono del programa MATLAB®.

2. Al iniciar aparecerá la ventana mostrada en la siguiente imagen:

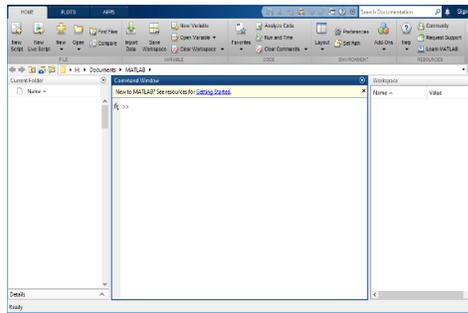


Figura 13. Aspecto inicial del programa MATLAB®.

3. Se debe crear un nuevo script en la ventana New Script:

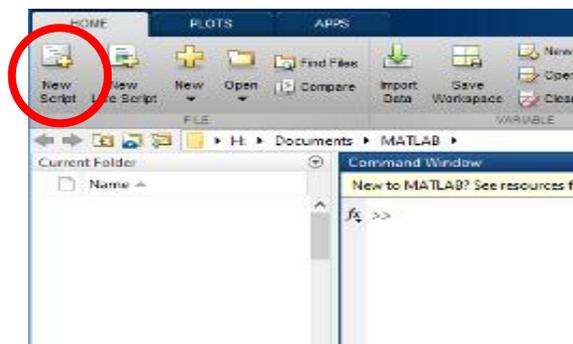


Figura 14. Icono de New Script.

4. Se mostrará la ventana mostrada a continuación:

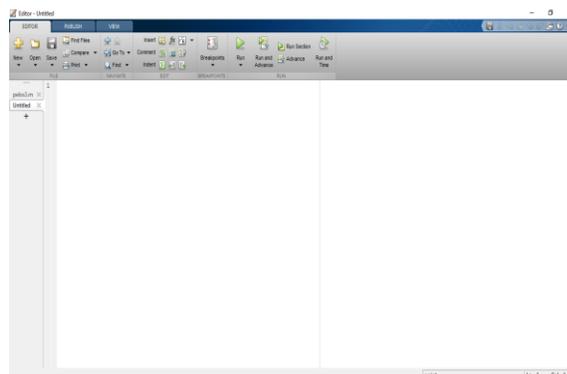


Figura 15. Pestaña de New Script.

5. En esta se deberán colocar los comandos necesarios para leer la imagen, convertirla de un modelo de color RGB a HSV y viceversa para obtener los

resultados del umbral usando solamente las 30 primeras imágenes, en este caso en específico se trabaja con el color amarillo debido a que como se mencionó por Blancard D., *et al.* (2000), Infoagro, (2018) y López C. (2003); la presencia de *Pseudosperonospora cubensis* presenta coloraciones amarillentas hasta dejar el tejido necrótico según se describe en el apartado de síntomas de la enfermedad en el marco teórico de este trabajo de investigación.

Las funciones que se deberán aplicar en esta ventana serán los siguientes:

```

imagen = 1:300

imgHSV=imread(strcat(num2str(imagen),'.png'));

figure(1), imshow(imgHSV), title('ORIGINAL');

imgHSV=rgb2hsv(im2double(imgHSV));

yellowIndex= repmat((imgHSV(:,:,1)>41/360)&(imgHSV(:,:,1)<60/360),[1 1 3]);

yellow=imgHSV.*yellowIndex;

Y = hsv2rgb(yellow);

figure(2), imshow(Y), title('AMARILLO')

```

La pantalla deberá observarse como se muestra a continuación:

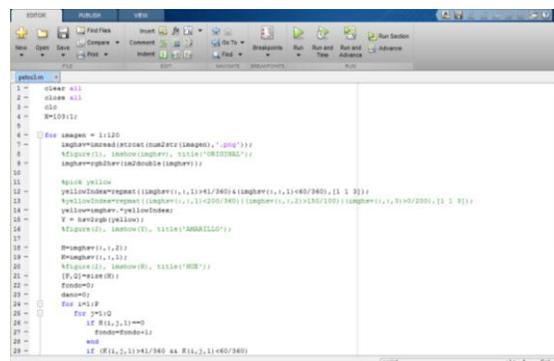


Figura 16. Aspecto que deberá tener la ventana de programación.

6. Como se muestra en la imagen y con el comando utilizado, se analizará cada una de las 30 primeras imágenes que, con anterioridad fueron editadas con el programa Paint, para quitarles el fondo, estas deberán analizarse de una por una dándole rangos de color al amarillo en donde se indica a continuación:

```

- for imagen = 1:120
-   imghsv=imread(strocat(num2str(imagen),'.png'));
-   %figure(1), imshow(imghsv), title('ORIGINAL');
-   imghsv=rgb2hsv(im2double(imghsv));

-   %pick yellow
-   yellowIndex=regmat((imghsv(:,:,1)>41/360) & (imghsv(:,:,1)<60/360), [1 1 3]);
-   %yellowIndex=regmat((imghsv(:,:,1)<200/360) | (imghsv(:,:,2)>150/100) | (imghsv(:,:,3)>0/200), [1 1 3]);
-   yellow=imghsv.*yellowIndex;
-   Y = hsv2rgb(yellow);
-   %figure(2), imshow(Y), title('AMARILLO');

```

Figura 17. Especificación del comando a modificarse para valores de amarillo.

Los valores evaluados van entre 30 y 65 por ser el rango de color amarillo que corresponde a las afectaciones de Mildiú, y se selecciona el comando RUN para realizar el análisis.

De esta manera, tal como se muestra en la imagen anterior, los rangos utilizados corresponden a, por ejemplo,

$$(imghsv(:,:,1)>41/360) \& (imghsv(:,:,1)<60/360), [1 1 3]$$

Como se observa de debe utilizar el mínimo y el máximo para amarillos. Esto debe realizarse de esta manera dada la posición del amarillo en Hue de la escala HSV; esto debe indicarse así:

$$(:,:,1)>n/360 \text{ y } (:::,1)<m/360$$

Donde n es el valor mínimo y m el máximo que se le asignó.

7. Una vez que se coloca el rango para evaluar cada imagen el programa se corre para dar como resultado un par de imágenes donde se muestra primero la imagen convertida a sistema HSV como en la siguiente imagen.

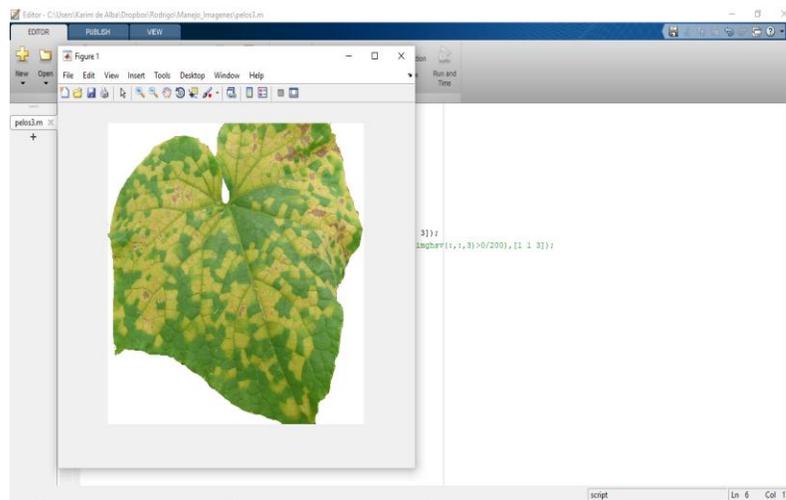


Figura 18. Obtención de figura original en HSV.

Posteriormente el programa muestra la figura segmentada en donde solo aparecen los pixeles que poseen el rango de color indicado, esta figura posee el fondo negro y tiene el aspecto que se muestra en la figura 19.

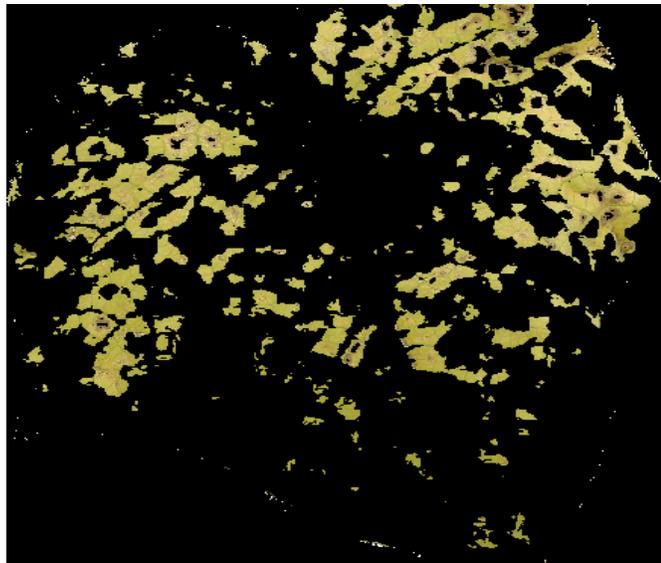


Figura 19. Aspecto de la imagen segmentada por discontinuidad con los valores que fueron colocados en el comando.

8. Se comparó el aspecto de la imagen original con respecto a la resultante para anotar así el rango que más se acercara a la forma que presenta la afectación en la hoja y los resultados fueron anotados en una hoja de cálculo de Excel,

esto con la finalidad de obtener el promedio que sirvió de referencia para comprobar los resultados obtenidos; se anotó el número mínimo y máximo utilizado para cada imagen.

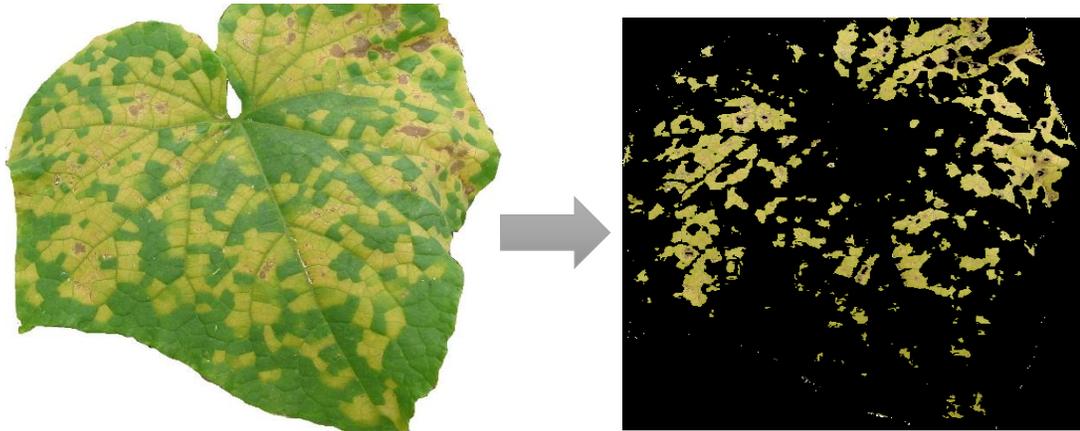


Figura 20. Comparación de la imagen original y la que resulta de la segmentación.

Obtención del porcentaje de afectación por hoja utilizando MATLAB® R2018a

Para la obtención de los porcentajes se acudió a la programación usando MATLAB® R2018a siguiendo la secuencia que a continuación se presenta:

1. Una vez que se determinó el umbral para el color amarillo en Hue se repitió el proceso de segmentación para 70 imágenes que anteriormente tomaron el mismo tratamiento para quitar el fondo (ruido) mediante el uso del programa Paint, el umbral determinado para estas imágenes es el correspondiente al obtenido con anterioridad teniendo un valor mínimo de 40 y máximo de 60.
2. Se programó en la ventana de MATLAB® para que realizara el conteo de los pixeles totales de la imagen mediante las variables de P y Q que corresponden al alto y al ancho de la imagen; además de contar los pixeles del fondo al resultado esta acción se le llamo “fondo” y a su vez los que contara los pixeles que se encontraban entre los rangos de color de 40 a 60 y el resultado de este conteo correspondía al daño por Mildiú, al resultado numérico de este conteo se le llamo “dano” para esta acción se utilizó el siguiente comando:

```

[P,Q]=size(H);
fondo=0;
dano=0;
for i=1:P
    for j=1:Q
        if H(i,j,1)==0 fondo=fondo+1;
        if (K(i,j,1)>41/360 && K(i,j,1)<60/360) dano=dano+1;
    end
end
end

```

3. Para la obtención del porcentaje de daño, que en este caso correspondía a los pixeles con los rangos del umbral, se indicó en la ventana de comandos que realizara la operación aritmética de los valores de daño entre el valor de la hoja, que corresponde a su vez a el tamaño total de la imagen menos los valores del fondo, para finalmente multiplicarlo por 100 y así obtener un porcentaje; el comando que se utilizó es el siguiente:

```

hoja = P*Q - fondo;

ptje = (dano/hoja) * 100;

```

1. Finalmente se realizó programación para la obtención de los resultados insertos en una tabla, donde únicamente se mostró el porcentaje de afectación por hoja mediante el siguiente comando:

```

X=['El dano para la hoja ',num2str(imagen),' es de ',num2str(ptje),'%'];

X(imagen) = ptje;

```

Los resultados de esta operación se muestran en la ventana de la siguiente manera:

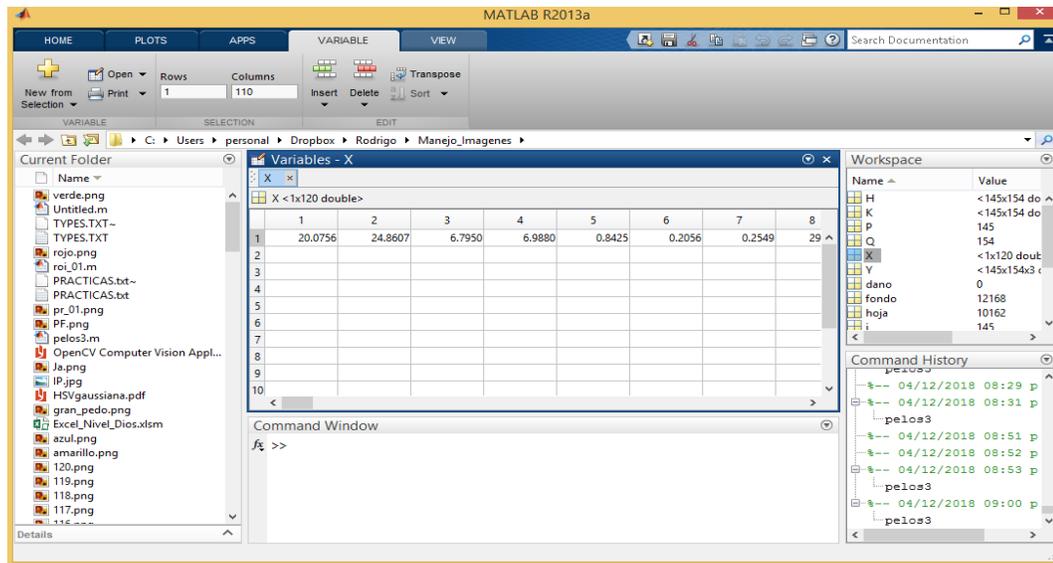


Figura 21. Aspecto de la ventana de comandos al realizarse la operación de obtención de porcentajes.

Obtención del porcentaje de color en hojas hoja utilizadas como testigos

Para la obtención de los porcentajes de color amarillo en modelos HSV en hojas que presentan cenicilla y hojas que no presentan daños se siguió con el mismo proceso anteriormente descrito que comprende la obtención de las imágenes, quitarles el ruido, llevarlas a modelos HSV y fragmentarlas con los valores de Hue en 41 a 60, para después obtener el porcentaje de color por hoja.

Resultados y discusión

Resultados de la obtención del umbral en la segmentación

Los primeros 30 resultados fueron utilizados para definir un umbral general de datos, esto se logró al obtener el promedio del valor máximo y mínimo, el cual resultó en valores de Hue para amarillo entre 40 y 60.

Una vez que se obtuvo el umbral con el promedio de las primeras 30 imágenes, este valor fue utilizado para la fragmentación de las 70 imágenes restantes, de esta manera se comprobó que este valor del umbral obtenido realmente es el que mostró la afectación por *P. cubensis* en el resto de los casos analizados.

El cuadro 2 muestra los valores que fueron ingresados al programa para obtener la segmentación de las primeras 30 imágenes, así como el promedio obtenido y los datos que se tomaron en cuenta al final para determinar el umbral de valor en Hue para mostrar la presencia de Mildiú.

Tabla 2. Valores registrados para la determinación del umbral en la identificación de Mildiú

Imagen	Hue min.	Hue máx.	Imagen	Hue min.	Hue máx.
1	40	60	17	43	56
2	41	59	18	45	50
3	38	60	19	42	60
4	41	60	20	44	55
5	38	60	21	48	60
6	37	62	22	33	65
7	37	64	23	40	58
8	43	58	24	38	59
9	45	60	25	40	65
10	38	60	26	47	57
11	38	59	27	38	63
12	38	59	28	44	55
13	37	61	29	41	58
14	35	65	30	37	60
15	37	61	PROMEDIO	40.17	59.67
16	43	55	VALOR DE HUE	40	60

Los valores obtenidos de las primeras 30 imágenes se usaron valores como mínimo de 33 y un máximo de 65, esto en Hue, lo que corresponde a la representación del

matiz o tono; para determinar explicar cómo se obtuvo el valor de Hue cabe recordar que se utiliza el círculo cromático y cada valor de este atributo corresponde a los grados de inclinación del radio que toma en la representación del color dentro del sistema de HSV Ortiz, F. (2002) y Benimelli, E. (2011). Esto quiere decir que los valores para el color amarillo en el sistema HSV en la identificación de Mildiú (*S. cubensis*) tomando el promedio de las 30 imágenes que fueron segmentadas da valores de 40.17 y 59.17. De estos valores se tomó el entero más próximo para determinar el umbral que fue de 30 a 60, que como se mencionó esto corresponde al ángulo que se debe recorrer en el círculo cromático para la detección de áreas dañadas por Mildiú en el modelo HSV, por lo que en la obtención del porcentaje se consideró el siguiente comando:

```
yellowIndex=repmat((imghsv(:,:,1)>40/360)&(imghsv(:,:,1)<60/360),[1 1 3]);
```

Resultados de la obtención de porcentaje de afectación

Para obtener los porcentajes de daño por Mildiu en las hojas de pepino mediante MATLAB® se usó el tamaño de la imagen multiplicando el alto y el ancho para obtener la cantidad de pixeles de esta imagen. A este total de pixeles se le restan la contabilización de pixeles blancos, o fondo de la imagen para obtener el total de pixeles de la hoja. Después de obtener en número de pixeles que se consideró como el área total de la hoja, se consideró el número de pixeles que se segmentaron de acuerdo al umbral que va de 40 a 60 para valores de Hue para finalmente realizar la operación matemática de obtener la relación entre el total de la imagen menos los pixeles que no eran blancos y ese dato dividirlo entre el número de pixeles que se consideraron en la fragmentación y multiplicarlo por 100 para obtener el porcentaje.

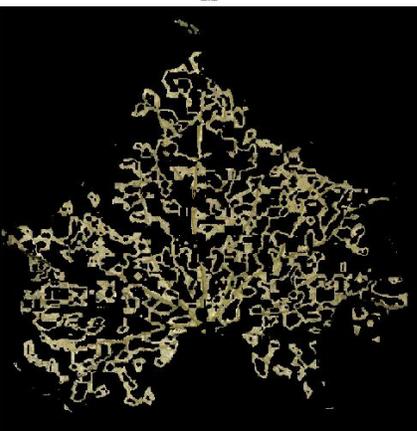
Los resultados obtenidos para las 100 imágenes se analizan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Porcentajes de afectación obtenidos

Imagen	%	Imagen	%	Imagen	%	Imagen	%
1	20.1836	26	27.1481	51	0.1268	76	2.1242
2	25.2859	27	0.0043	52	2.9073	77	3.3656
3	6.8336	28	17.3240	53	3.8672	78	1.7431
4	7.0470	29	9.1533	54	0.0431	79	1.6280
5	0.8732	30	4.4176	55	0.0417	80	28.6276
6	0.2066	31	0.1446	56	7.3645	81	4.3713
7	0.2549	32	2.3238	57	1.9784	82	7.3312
8	30.5396	33	0.6825	58	1.7690	83	2.7636
9	6.8156	34	25.2439	59	12.9108	84	2.9059
10	1.3486	35	20.0114	60	25.8703	85	0.2334
11	3.3061	36	17.2269	61	19.6161	86	0.4648
12	1.6148	37	17.5238	62	25.1436	87	0.1463
13	2.9086	38	17.3592	63	4.5030	88	0.5597
14	0.0550	39	10.1135	64	7.2189	89	21.5928
15	7.7449	40	35.4125	65	2.8957	90	20.6471
16	23.2857	41	16.2885	66	20.9783	91	7.6944
17	21.4146	42	6.7550	67	0.3932	92	8.6451
18	27.1496	43	6.8082	68	0.5566	93	0.4611
19	36.1496	44	0.9083	69	10.8192	94	0.6925
20	35.3777	45	0.2320	70	1.0213	95	2.9207
21	26.0486	46	7.0633	71	0.4965	96	11.7303
22	0.6919	47	35.4805	72	4.3798	97	0.2017
23	2.8088	48	4.3839	73	21.9770	98	0.2532
24	1.0593	49	5.0854	74	27.5563	99	18.4952
25	1.1400	50	4.3536	75	25.2710	100	7.4301
Promedio de %							9.68

Como observa el valor del mínimo porcentaje es de 0.0043 para la imagen 27 y el máximo es de 36.1496% para la imagen 19, los datos obtenidos para los valores máximo y mínimo de afectación se muestran la tabla 4.

Tabla 4. Comparación de las características de las imágenes con menor y mayor porcentaje de afectación detectado por el programa

Atributo	Imagen 27	Imagen 19
Imagen HSV		
1ra segmentación		
Rango utilizado para la segmentación	38 y 63	42 y 60
Dimensiones (P y Q)	1080 x 1080	745 x 760
Total de pixeles en la imagen	1,166,400	556,200
% de daño obtenido	0.0043	36.1496%

Como se observa en el cuadro anterior, las diferencias entre las imágenes con menor y mayor porcentaje de afectación son evidentes al mostrarse en la imagen original puesto que la de mayor porcentaje ya se encuentra necrótica en algunas partes de la misma. Por otro lado la que contiene el menor porcentaje de afectación contiene solo

muy poca evidencia de daño. Adicionalmente, se muestra el aspecto de la imagen cuando fue inicialmente segmentada para obtener el umbral, la de menor porcentaje solo muestra unas pequeñas partes que fueron identificadas para este rango de color y la contraria muestra gran evidencia de pixeles con estas características dentro del umbral identificado.

Los resultados obtenidos de las 100 imágenes analizadas muestran que los porcentajes están mayor representados en rangos de entre 1 a 10% con la presencia de 44 registros (correspondiente al 44% del total de imágenes), seguido de rangos menores al 1% de daño con 24, posteriormente afectaciones entre el 20 a 30% con 18 registros; las afectaciones con menor representación son los que van de 11 a 20% y a más del 30%, esta información se muestra en la figura siguiente:

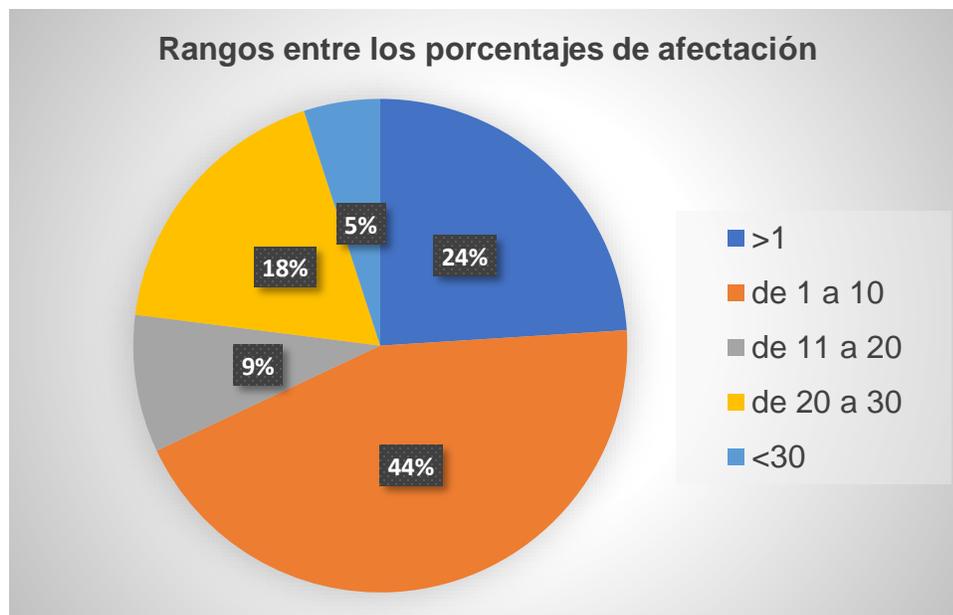


Figura 22. Relación entre los porcentajes de afectación agrupados por rangos.

Como de muestra y según lo especificado por Blancard D. *et al.*, (2000) e Infagro. (2018.), los daños ocasionados por Mildiú tienen a ser muy agresivos, puesto que considerando que estas imágenes representan solo el porcentaje en una hoja y que las fotografías son tomadas regularmente para mostrar sintomatología inicial, lo que puede traducirse como que el daño tiende a identificarse cuando se tiene ya alrededor

del 10% de afectación por hoja. Otro dato importante que hay que rescatar es que el promedio de afectación de las 100 hojas evaluadas es de 9.68% y que el valor en porcentaje no se repite en ninguno de los casos.

De los resultados obtenidos se puede determinar que la afectación con menos de 10% es la que es más constante con 37 registros en total. Por su parte el máximo que se repite se encuentra entre el 35% con 3 registros y el mínimo presentado es alrededor de 0% con 16 registros. Esto refleja la creación de falsos negativos puesto que todas las imágenes tiene afectaciones a simple vista, es de mencionarse que ningún valor es 0%, sin embargo, si se presentan valores muy bajos. La relación entre los datos mencionados se presenta en siguiente imagen:

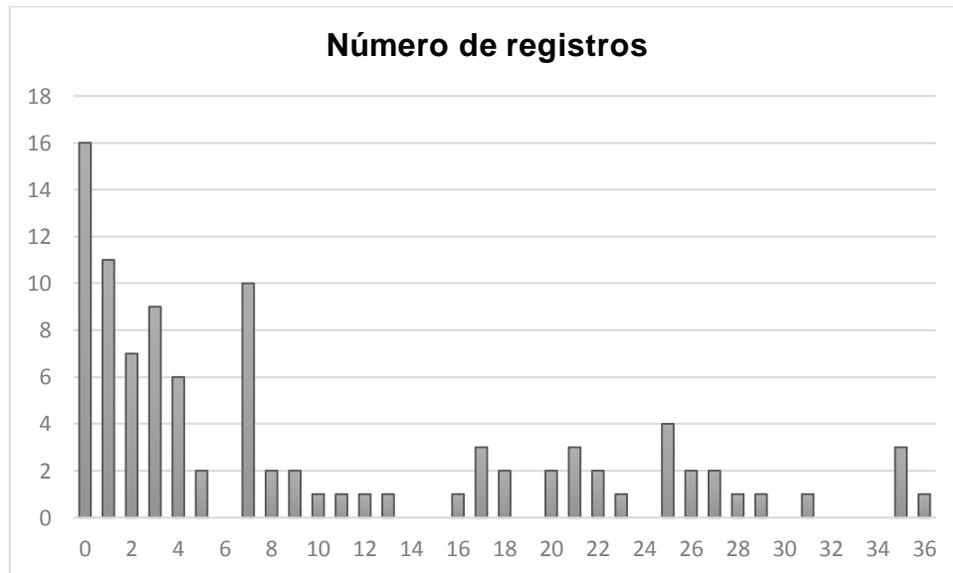


Figura 23. Número de registros con relación entre los porcentajes de afectación agrupados por números enteros.

Dado que el 16% de los registros presentan falsos negativos se puede determinar que este programa tiene una eficiencia de cerca del 85%, sin embargo, como se mencionó anteriormente ningún valor fue cero, por lo que se realizó la comprobación de éste para imágenes que presentan otra enfermedad en específico cenicilla ocasionada por *Sphaerotheca fuliginea* y para hojas sanas que funcionaron como testigos.

Resultados de la segmentación de hojas testigo

A continuación, se presentan y discuten los resultados obtenidos con respecto a la obtención del porcentaje de afectación por hojas testigo

Tabla 5. Resultados obtenidos de la segmentación de las hojas testigo

Imagen*	% de color	Imagen*	% de color
101	1.2747	111	0.0635
102	5.8776	112	0.0101
103	1.6446	113	0.0464
104	0.1190	114	0.0230
105	0.2543	115	0.0626
106	1.9122	116	0.0073
107	0.6992	117	0.1634
108	0.0743	118	0.1913
109	0.2729	119	0.0024
110	0.9535	120	0.0000

**Las imágenes del 101 al 110 representan las que tienen presencia de cenicilla, por su parte las imágenes 111 a 120 fueron consideradas hojas sanas.*

son 14 las imágenes que poseen menos del 1% de coloración, y 6 las que presentan alguna tonalidad de amarillo entre los rangos que fueron introducidos en la segmentación.

Una vez que se agrupan los valores en números enteros para el porcentaje se observa que son 14 los registros que no poseen presencia de píxeles en color amarillo lo que corresponde a casi el 75% del total, o como se especifica en la tabla son inferiores al 1% de afectación.

La siguiente gráfica muestra los valores en números enteros de los resultados obtenidos:



Figura 24. Número de registros en hojas testigo con relación entre los porcentajes de afectación agrupados por números enteros.

Los resultados encontrados muestran que hubo 6 imágenes que presentan coloraciones amarillas, por lo que es interesante relacionar lo descrito en los propios sistemas de color y el cómo se obtiene una imagen digital, para poder determinar la eficiencia del programa generado, pero también es importante conocer las características de las imágenes que fueron utilizada como testigos, para tal caso se muestra el aspecto y especificaciones de las imágenes con mayor y menos número de porcentaje en el siguiente cuadro:

Tabla 6. Comparación de las características de las imágenes con menor y mayor porcentaje de afectación detectado por el programa

Atributo	Imagen 120	Imagen 102
Imagen HSV		
% de color	0.0000	5.8776

Como era de suponerse no deberían encontrarse rangos de color equivalentes al Mildiú, sin embargo, con respecto a las propiedades del color de las imágenes digitales Báez J., *et al.*, (2004), La Serna, N. y Román, U. (2009), González R. y Woods R. (1996), y Ortiz, F. (2002), mencionan que las imágenes digitales en modelos RGB, el cual es el modelo más popularmente usado en los equipos de cómputo y cámaras digitales convencionales poseen en general poseen la propiedad tener una mezcla entre estos tres primarios y sus combinaciones; tal como se menciona en Conde-Acevedo, J. y Báez-rojas JJ. (2000) “tres son los valores que pueden representar un color con gran aproximación al analizar una imagen digital, esto se debe a la respuesta de tres diferentes sensores o fotorreceptores en la salida de una cámara digital” por lo que en él existe una amplia gama de colores en todas las imágenes, incluidos el amarillo, por lo que, en específico en González R. y Woods R. (1996) se aclara que la segmentación automática es una de las tareas más difíciles del procesamiento de imágenes. Esta etapa determina el eventual éxito o fracaso del análisis, de hecho, rara vez llega a alcanzar una solución satisfactoria, por lo que se debe buscar un método alternativo para la verificación de resultados.

Dicho lo anterior, es común que se halle una mezcla de colores entre las imágenes digitales se cual sea el modelo en que estén creados. Por eso es muy importante mencionar que en base a lo descrito por Martín J. (2017), donde se aclara que una imagen digital proporciona mucha información que generalmente necesita ser organizada para entender mejor los procesos que la originan, la organización más comúnmente utilizada es la de dividir la imagen según alguna característica o propiedad de las zonas localizadas, y para ello se utiliza la técnica matemática que consiste en dividir en un conjunto de datos, en este caso a la imagen, en subconjuntos llamados regiones o zonas que comparten alguna propiedad y se le denomina “segmentación”. También aclara que para que una segmentación sea eficiente deben generarse rangos de color específicos para cada componente de los modelos utilizados.

Bajo la premisa anterior se asume que para que la segmentación llegué a niveles más específicos deben encontrarse rangos no solo para el tono, sino para la saturación y

el brillo, además de que como se sugiere en Nandi, C.*et al.* (2014) un equipo eficiente y una buena toma, que incluya valores óptimos de luz, implica el éxito en la tecnificación de los procesos en identificación de factores por visión artificial.

En relación con el trabajo de Vázquez-López, N., *et al.* (2011), en el que se someten a consideración más variables como el tamaño uniforme de las imágenes, la calidad de resolución de la cámara y la distancia en que se toma la fotografía, se sugiere que se analicen no solo los valores para HUE sino también, componentes como los que se mencionan en dicho artículo para obtener mayores porcentajes de proximidad, en dicho trabajo los porcentajes obtenidos tienen un 2% de pruebas fallidas pero porcentajes de eficiencia que van de 50 al 100% en fotografías tomadas entre los 10 a los 50 cm de proximidad a la hoja, estos factores como la resolución y la distancia deben tomarse en cuenta al llevar a este experimento a una siguiente etapa que implica la toma directa de las imágenes.

Conclusión

La elaboración de un programa usando MARTLAB® resultó útil para la identificación de los daños ocasionado por Mildiú (*Pseudoperonospora cubensis*) en imágenes digitales obtenidas en diversos medios, se conoció el umbral para los valores de Hue en sistemas HSV que va de 40 a 60. Por otro lado, se comprobó la eficacia del mismo en un 85% de los casos en que se mostró el daño ocasionado.

Se generó un comando que cumple con el objetivo de determinar el porcentaje de área foliar en pepino que ha sido afectado por esta enfermedad, mediante la relación entre el área de hoja sana y hoja que presenta evidencia de Mildiú, los resultados fueron comprobados al tratar imágenes que no presentaban evidencia de daño por este hongo encontrado que se presentan en algunos casos en que el umbral de color seleccionado está presente, se asume que se debe a la naturaleza del modelo de color en sí y a las cualidades de la imagen digital.

Se sugiere que para que el porcentaje de eficiencia de los comandos generados sea mayor se evalúen los otros dos componentes del modelo HSV para que sea más específico el resultado con respecto a el área final determinada.

8. Literatura citada

- Angulo, J. y Serra, J. 2005. Segmentación de Imágenes en Color utilizando Histogramas Bi-Variantes en Espacios Color Polares Luminancia/Saturación/Matiz. *Computación y Sistemas*, 8(4), 303-316.
- Báez J. y Alonso M. 2008. Uso del sistema HSI para asignar falso color a objetos en imágenes digitales. *Revista Mexicana de Física* 54(2) 186-192.
- Báez J., Guerrero M., Conde J., Padilla A., Vivanco A y Urcid G. 2004. Segmentación de imágenes de color. *Revista Mexicana de Física* 50(6) 579-587.
- Barberá, J. s/a. El color y los Modelos de color RGB, HEX, HTML, CMYK. España. Horizonteweb. Recuperado de: <https://www.xn--diseowebmurcia1-1qb.es/modelos-de-color/> Consulta: 13/11/18.
- Benimelli, E. 2011. *Los colores en Informática: modelos RGB y HSV*. España. Creative Commons. Disponible en: <http://www.esferatic.com/wp-content/uploads/rgb-hsv-gimp.pdf> Consulta 13/11/18.
- Blancard D., Lecoq H., Pitrat M. 2000. *Enfermedades de la cucurbitáceas. Observar, identificar, luchar*. Ediciones Mundi-prensa. España.
- Cáceres C., Amaya D., Ramos O. 2014. Procesamiento de imágenes para reconocimiento de daños causados por plagas en el cultivo de *Begonia semperflorens* (flor de azúcar). *Acta agronómica* 64(3) 273-279. DOI <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n3.42657>
- Calvo, I. 2018. El modelo CIE XYZ. Chile. Proyecta Color. Recuperado de: <http://proyectacolor.cl/aplicacion-del-color/modelos-de-color/modelo-cie/> Consulta: 13/11/18.
- Castro, J., Cerquera, N., Gutiérrez, N. 2013. Determinación del color del exocarpio como indicador de desarrollo fisiológico y madurez en la guayaba era (*Psidium guajava* cv. Guayaba pera), utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes. *Revista EIA* 10(19) 78-89.
- Chen, Y., Chao, K., Moon S. 2002. Machine visión technology por agricultural applications. *Computers and electronics in Agricultura* 36 173-191 p.
- Cohen, Y., Rubin, A., Galperin M., Ploch, S., Runge F. y Thines M. 2014. Seed transmisión of *Pseudoperonospora cubensis*. *PLoS ONE* 9(10) 12p. DOI: 10.1371/journal.pone.0109766.

- CONABIO, 2011. *Cucumis sativus*. Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados (SIOVM). Proyecto GEF-CIBIOGEM de Bioseguridad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Usos de la Biodiversidad. México. 27 p.
- Conde-Acevedo, J. y Báez-rojas JJ. 2000. Conversión de un conjunto de imágenes multiespectrales a un sistema RGB. *Revista mexicana de física* 46(1), 45-51.
- De los Santos, A. 2010. *Fundamentos visuales 2. La teoría del color*. Perú. Grupo IDAT Diseño Gráfico.
- González R. y Woods R. 1996. *Tratamiento digital de imágenes*. Adison-Wesley Publising Co. Reading. USA.
- Guzmán O., Gómez E., Rivillas C. y Oliveros C. 2003. Utilización del procesamiento de imágenes para determinar la severidad de La Mancha de Hierro del Cafeto, en hojas de café. *CENICAFÉ* 54(3), 258-265.
- Guzmán, O., Gómez, E., Rivillas, C., Oliveros, C. 2003. Utilización del procesamiento de imágenes para determinar la severidad de La Mancha de Hierro del Cafeto, en hojas de café. *Cenicafé* 54(3) 258-265.
- Hernández J. 2016. Estudio e implementación de algoritmos de visión artificial y modelos de color para la determinación de cobertura vegetal: aplicación en cultivos hortícolas. Tesis de Licenciatura. Departamento de Informática y Sistemas. Universidad de Murcia. 61 p.
- Hernández, C. 2011. Caracteres de importancia agronómica, análisis de crecimiento y extracción nutrimental en colectas de “pepino mixteco” (*Cucumis anguria* L.). Tesis como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura. Departamento de Fitotecnia. Instituto de Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo. México. 172 p.
- Infagro. 2018. Mildiu en cucurbitáceas: *Pseudoperonospora cubensis*. Revista Infoagro. Disponible en: <https://infoagro.com/mexico/mildiu-en-cucurbitaceas-pseudoperonospora-cubensis/> Fecha de consulta: 19/11/18.
- INIFAP, 2013. Producción de pepino con abonos orgánicos y biofertilizantes en medio protegido. Desplegable para productores Núm. 52. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Campo Experimental Cotaxtla. INIFAP-SAGARPA. México.
- La Serna, N. y Román, U. 2009. Técnicas de segmentación en Procesamiento digital de imágenes. *Revista de Ingeniería e Informática* 6(2) 9-16.

- López C., 2003. *Guía Técnica: Cultivo del pepino*. El Salvador. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. CENTA.
- Martín, J. 2017. Método de segmentación basado en la estructura fractal del mapa de singularidades. Aplicación a imágenes de uso agrícola. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas. Universidad Politécnica de Madrid. 172 p.
- Martínez, F. 2001. Diseño de un Colorímetro Triestímulo a partir de una cámara CCD-RGB. Tesis Doctoral. Departamento de Óptica y Optometría. Universidad de Catalunya. España. 400 p.
- Nandi, C., Tudu B. y Koley C. 2014. *Machine vision based techniques for automatic mango fruit scorting and grading base don maturuty level and size*. Sensing Technology: Current status and future trends II. Smart Sensor, Measurement and Instrumentation. USA. 27-46.
- Ortiz, F. 2002. Procesamiento morfológico de imágenes en color. Aplicación a la reconstrucción geodésica. Tesis doctoral. Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante. España. 215 p.
- Padrón, C. 2009. Sistema de visión computarizada y herramientas de diseño gráfico para la obtención de imágenes de muestras de alimentos segmentadas y promediadas en coordenadas CIE-L*A*B. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 283-301.
- Padrón-Pereira C. 2009. Sistema de visión computarizada y herramientas de diseño gráfico para la obtención de imágenes de muestras de alimentos segmentadas y promediadas en coordenadas CIE-L*A*B. *Agronomía Costarricense* 33(2) 283-301.
- Padrón-Pereira C. 2013. Utilización de imágenes digitales para la medición del diámetro de frutos de mandarina (*Citrus reticulata*) en crecimiento. *Ciencia y tecnología* 6(1) 1-9.
- Ruíz-Sánchez, E. Tún-Suárez J., Pinzón-López L., Valerio-Hernández G., Zavala-León, M. 2008. Evaluación de fungicidas sistémicos para el control del mildiú velloso (*Pseudoperonospora cubensis* Berk. & Curt.) Rost. en el cultivo del Melón (*Cucumis melo* L.) *Revista Chapingo. Serie Horticultura*. 14(1) 79-84.
- SAGARPA, 2015. Pepino. Hortalizas; Márgenes de comercialización. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México.

- Shetty, N., Wehner, T., Thomas, C., Dorochoowski, R., Shetty, K. 2002. Evidence for downy mildew races in cucumber tested in Asia, Europe, and North America. *Scientia Horticulturae* 94. 231-239 p. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423802000134>.
- Ureña, C. 2010. Modelos de color. *In* Visualización y Realismo. Departamento de Leguajes y Sistemas Informáticos. Estudios Técnicos Superiores en Informática y Telecomunicación. Universidad de Granada. España.
- Valencia, E. 2007. Procesado de imagen digital en color: Adquisición, análisis colorimétrico y realce. Tesis Doctoral. Departamento de Óptica y Optometría. Universidad Politécnica de Catalunya. 201 p.
- Vázquez-López, N., Yutaka S., Kazuhiro N., Mejía-Muñoz, J., Romanchik E. 2011. Detección de cenicilla en rosa usando procesamiento de imágenes por computadora. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17(2), 151-160.
- Villagómez, C. (2017). El formato PGN. CommentCaMarche.net disponible en: <https://es.ccm.net/contents/723-el-formato-png> Consulta: 20/11/2018.