

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO



DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Programa Docente de Ingeniero en Biotecnología

TESIS TITULADA

Diseño y validación de un algoritmo de segmentación de imágenes digitales de tallos de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) para la estimación de índices vegetales.

Por:

QUETZALLI MARICELA GARCIA AMARO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Programa Docente de Ingeniero en Biotecnología

TESIS TITULADA

Diseño y validación de un algoritmo de segmentación de imágenes digitales de tallos de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) para la estimación de índices vegetales.

PRESENTADA POR:

Quetzalli Maricela García Amaro

Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

De acuerdo con el artículo 90 del reglamento para Alumnos de Licenciatura

Dr. Marco Adán Juárez Verdáyez
Presidente

Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros
Vocal

Dr. Marco A. Castillo Campohermoso
Vocal

Dr. Javier Israel Montalvo Arredondo
Vocal


M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la división de ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Programa Docente de Ingeniero en Biotecnología

TESIS TITULADA

Diseño y validación de un algoritmo de segmentación de imágenes digitales de tallos de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) para la estimación de índices vegetales.

PRESENTADA POR

Quetzalli Maricela Garcia Amaro

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero en Biotecnología

Aprobada por el Comité de Asesoría:



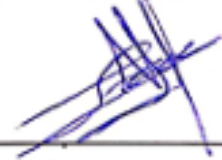
Dr. Marco Adán Juárez Verdáyez
Asesor principal interno



Dr. Marco A. Castillo Campohermoso
Asesor principal externo



Dr. Javier Israel Montalvo Arredondo
Coasesor interno



Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros
Coasesor externo

DERECHO DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

La presente tesis constituye un trabajo original elaborado por el autor, quien asume plena responsabilidad sobre el contenido aquí expuesto. Asimismo, se declara bajo protesta de decir verdad que durante el desarrollo de esta investigación se respetaron los principios de integridad académica, ética profesional y las disposiciones establecidas en la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos.

El autor manifiesta que no incurrió en prácticas de plagio, entendidas como la reproducción total o parcial de textos, ideas, datos, imágenes, figuras, tablas, gráficos, fotografías, mapas, ilustraciones o cualquier otro material protegido por derechos de autor sin el debido reconocimiento de la fuente correspondiente.

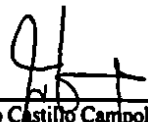
De igual manera, se declara que todas las referencias bibliográficas utilizadas fueron citadas de acuerdo con las normas académicas aplicables, evitando la apropiación indebida de trabajos de terceros, el uso de información sin atribución, el autoplagio o cualquier otra conducta que contravenga los principios de honestidad académica.

Asimismo, se reconoce que cualquier uso no autorizado de material protegido por derechos de autor puede generar responsabilidades legales conforme a la legislación vigente.

Por lo anterior, el autor declara que este trabajo de investigación es resultado de un esfuerzo académico propio, que no ha sido presentado previamente para la obtención de otro grado académico en esta u otra institución educativa, y que toda la información proveniente de fuentes externas ha sido debidamente reconocida y referenciada.

Atentamente
Alma Terra Mater


Quetzalli Maricela García Amaro
Autor Principal


Marco Castillo Campohermoso
Asesor Principal

Agradecimientos

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, institución que me brindo la oportunidad de formarme profesionalmente y adquirir conocimientos, valores y las herramientas que fueron necesarias para mi desarrollo profesional y como personas.

Asimismo, agradezco al **Centro de Investigación en Química Aplicada** por abrirme sus puertas para la realización de este trabajo de investigación proporcionándome las instalaciones, recursos y el ambiente científico que hicieron posible el desarrollo de esta tesis. De manera especial, agradezco el apoyo económico otorgados mediante la beca institucional, la cual contribuyo significativamente a la realización de este proyecto.

Al Dr. Marco Castillo Campohermoso por todo su apoyo, paciencia y valiosas aportaciones durante cada etapa de la investigación. Su experiencia, conocimientos y constante apoyo fueron fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.

Agradezco también al **Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros** por su gran apoyo brindado durante el desarrollo de la investigación, contribuyendo de manera importante al fortalecimiento de este proyecto

Al **Dr. Javier Israel Montalvo Arredondo** por la disposición brindada para formar mi comité evaluador.

Deseo expresar un especial agradecimiento a mis tíos, Diego y Maricela, por su apoyo incondicional durante esta etapa académica. Gracias por sus consejos, orientación y valiosas aportaciones que contribuyeron al enriquecimiento de esta tesis. Su confianza, motivación y disposición para ayudarme fueron fundamentales para superar los desafíos que surgieron a lo largo de este proceso.

De manera especial quiero agradecer a Olivia Y alondra, quienes me acompañaron durante esta etapa académica, donde su compañía, ánimo y ayuda hicieron que este camino fuera más llevadero y significativo.

Finalmente agradezco a todas aquellas personas, docentes, compañeros y colaboradores que de una u otra forma contribuyeron a mi formación profesional y al desarrollo de esta investigación.

Dedicatoria.

A mi padre, Yony Garcia Bautista, que hoy vive eternamente en mi memoria y en mi corazón.

Aunque ya no estás físicamente para compartir este logro conmigo, cada paso que di para llegar hasta aquí estuvo acompañado por tu recuerdo, tus enseñanzas y tus palabras de aliento. Siempre me dijiste que no me preocupara, que siguiera adelante con confianza porque contaba con tu apoyo incondicional. Hoy comprendo que ese apoyo se convirtió en la fuerza que me impulsó a no rendirme.

A ti dedico este trabajo, porque fuiste guía en mi camino, fortaleza en la adversidad y ejemplo de esfuerzo y dedicación. Donde quiera que estés, espero que este logro llegue hasta ti como un reflejo de todo lo que sembraste en mí.

También dedico este trabajo a mi madre Dora Elia Amaro Picazo y a mis hermanos, Johnny, Jorge y Miguel por su compañía, apoyo y confianza a lo largo de esta etapa de mi vida. Gracias por estar presentes en los momentos difíciles y por compartir conmigo las alegrías de cada meta alcanzada.

A mis abuelos, por su cariño, sus consejos y los valores que me han transmitido. Su ejemplo de trabajo, perseverancia y amor por la familia ha sido una inspiración constante en mi formación personal y profesional.

A todos ustedes, con profundo amor, respeto y gratitud, les dedico este logro, que también es suyo.

Índice General.

1. Introducción	1
Hipótesis.....	3
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo general.....	3
1.2 Objetivo específico.	3
2.0 Revisión de Literatura.	4
2.1 Antecedentes de la candelilla.	4
2.2 Descripción de la Candelilla.	4
2.2.1 Hojas.	4
2.2.2 Tallo.....	4
2.2.3 Flor	5
2.2.4 Floración.	5
2.2.5 Raíz.....	5
2.2.6 Crecimiento.....	6
2.2.7 Clima.....	6
2.2.8 Adaptación a climas extremos.....	6
2.3 Distribución y Aprovechamiento.	7
2.3.1 Hábitat y Distribución.....	7
2.3.2 Aprovechamiento	7
2.3.3 Recolección y época de corte.	8
2.3.4 Factores climáticos que favorecen la plantación.	8
2.3.5 Estados con mayor producción.	8
2.5 Perspectivas del aprovechamiento.....	9
2.6.1 Análisis de imágenes en la agricultura	9
2.6.2 ¿Qué es una imagen?	10
2.6.3 Píxel.....	10
2.6.4 Espacios de color RGB.....	10
11	
2.6.5 Formato RGB.....	11
2.6.6 Espacio HSV.....	11
2.6.5 Análisis de imágenes.....	12
2.6.5.1 Filtrado de imágenes.....	13

2.6.7 Segmentación de imágenes.	13
2.7 Metodologías para el análisis de imágenes en objetos biológicos.	13
2.7.1 Obtención de imágenes	14
2.7.2 Preprocesamiento de imágenes.	14
2.7.3 Extracción de objetos de interés	15
2.7.3.1 Índices vegetales.....	16
2.7.3.2 Histogramas y Boxplot	16
2.8 Aplicaciones en plantas por medio de RGB	17
2.8.1 Análisis multiescala de imágenes digitales para estimar el crecimiento de plantas ornamentales	17
2.8.2 Evaluación no destructiva de plantas almacenadas in vitro	18
3.0 Materiales y Métodos	19
3.1 Recolecta y selección de ejemplares de candelilla (<i>Euphorbia antisiphilitica</i>)	19
3.3 Captura de imágenes digitales del material vegetal de candelilla.	20
3.3.1 Fondo y distancia de tallo a cámara controlado.	20
3.4 Preprocesamiento de imágenes obtenidas mediante técnicas de filtrado y conversión a los espacios de color RGB y HSV	21
3.4.1. Preprocesamiento de imágenes	21
3.4.2 Generación de imágenes binarias y operaciones morfológicas	22
3.4.3 índices vegetales.....	24
3.5 Procesamiento de imágenes digitales.....	25
4. Resultados.....	25
4.1 Recolecta y selección de ejemplares de candelilla (<i>Euphorbia antisiphilitica</i>)	25
4.2 Captura de imágenes digitales del material vegetal de candelilla.	25
4.3 Preprocesamiento de imágenes obtenidas mediante técnicas de filtrado y conversión a los espacios de color RGB y HSV	26
4.4 Índices vegetales.....	30
5. Conclusión.....	33
6. Referencias.	34

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Formula de índices vegetales	24
---	----

Índice de figuras

Figura 1 Distribución de la candelilla. (Vargas et al., 2020).....	7
Figura 2 Ilustración sobre un cubo del Espacio de Color RGB. (Cortés et al., 2011).....	11
Figura 3 Espacio de color HSV (The MathWorks, 2026)	12
Figura 4 Colecta del material vegetal en la localidad de Palma Gorda	20
Figura 5 Selección de esquejes.	20
Figura 6 Plantación de esquejes	20
Figura 7 Antes y después de aplicar el fondo azul.....	21
Figura 8 A) imagen original, B) Separación de canales en RGB, C) Separación de canales HSV	22
Figura 9 Lado izquierdo representa $V1 > H1$ & $V1 > S1$ mientras que el lado derecho $G1 > R1$ & $G1 > B1$	23
Figura 10 Diagrama del flujo de trabajo; Error! Marcador no definido	26
Figura 11 Histograma de la imagen original	27
Figura 12. Histograma de la imagen segmentada.	29
Figura 13 Boxplot de la imagen antes de segmentar	30
Figura 14 Boxplot de la imagen segmentada	30
Figura 15 Índices vegetales calculados	31

Resumen.

La candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) es una especie endémica del desierto chihuahuense de alto valor económico debido a la cera presente en sus tallos; sin embargo, su aprovechamiento tradicional ha provocado la sobreexplotación de sus poblaciones naturales, lo que hace necesario el desarrollo de alternativas tecnológicas para su manejo sostenible. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue implementar un método basado en visión artificial y análisis de imágenes digitales para estimar el área visible de los tallos y generar información útil para su manejo agronómico. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y experimental, utilizando imágenes digitales. El procedimiento incluyó la descomposición en canales RGB, la aplicación de técnicas de segmentación y el cálculo de índices de vegetación, con el fin de extraer información relacionada con el estado fisiológico y vigor de la planta. La evaluación se realizó mediante el análisis comparativo de los valores obtenidos en los distintos canales e índices. Los resultados mostraron que la segmentación permitió aislar eficazmente los tallos, facilitando la estimación de su área visible. Asimismo, los índices de vegetación derivados de RGB evidenciaron sensibilidad para detectar variaciones en el vigor vegetal. En conclusión, la visión artificial constituye una alternativa viable para el monitoreo y manejo sostenible de la candelilla, contribuyendo a su conservación y aprovechamiento sustentable.

Palabras clave: candelilla, visión artificial, segmentación de imágenes, índices de vegetación, agricultura 4.0, RGB.

1. Introducción

El Desierto Chihuahuense (DCH) constituye la ecorregión árida más extensa de América del Norte. Esta región se extiende a lo largo del norte de México, incluyendo los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Nuevo León y Tamaulipas, y se proyecta hacia el sureste de los Estados Unidos, en áreas de Arizona, Nuevo México y Texas, a pesar de sus condiciones climáticas extremas, caracterizadas por altas temperaturas, escasa precipitación y suelos pobres, el DCH alberga una biodiversidad notablemente adaptada a estas condiciones de estrés abiótico (Granados et al., 2011). Una de las especies emblemáticas de esta región es la candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.), planta perenne que ha desarrollado adaptaciones fisiológicas como la producción de una capa cerosa en sus tallos para reducir la pérdida de agua por evapotranspiración (Villanueva et al., 2011). Esta cera, altamente valorada por sus propiedades fisicoquímicas, ha sido aprovechada tradicionalmente por comunidades del norte de México durante más de un siglo, con aplicaciones en las industrias alimentaria, cosmética, farmacéutica y de recubrimientos (Cabello et al., 2013). En México, la cera de candelilla representa una fuente significativa de ingresos para poblaciones rurales, siendo el estado de Coahuila el principal productor nacional con cerca del 80% del volumen total (Govea M. 2018). Municipios como Cuatro Ciénegas, Ocampo y Sierra Mojada destacan por su papel protagónico en esta actividad económica (Govea M, 2018). Sin embargo, este aprovechamiento ha sido históricamente de origen silvestre, basado en métodos extractivos poco sustentables, como el arranque completo de la parte aérea de la planta, lo que limita su regeneración natural y contribuye a la reducción de sus poblaciones (Canales et al., 2006)

La ausencia de prácticas de cultivo establecidas y el desconocimiento técnico entre los recolectores, conocidos como candelilleros, agravan esta problemática ambiental, económica y social. Frente a este escenario, resulta prioritario

implementar estrategias de manejo sostenible y establecer protocolos de cultivo agronómico para la candelilla, que aseguren la conservación del recurso sin comprometer los medios de vida de las comunidades locales. Una de las herramientas emergentes en este campo es el avance de la agricultura de precisión y el uso de inteligencia artificial han demostrado ser aliados clave para mejorar la producción agrícola en ambientes adversos. Una de las tecnologías clave dentro de este enfoque es el procesamiento de imágenes digitales mediante cámaras RGB donde los algoritmos de segmentación de imágenes desempeñan un papel fundamental, ya que permiten separar el objeto de interés (planta) del fondo mediante técnicas como la umbralización, el análisis de histogramas y el uso de relaciones entre canales de color (González y Woods, 2018), el cual permite evaluar de forma no destructiva el desarrollo vegetal, detectar estrés fisiológico y estimar variables biofísicas de las plantas (Ibaraki y Gupta, 2015), donde a partir de estas imágenes digitales, es posible obtener información cuantitativa mediante el uso de índices vegetales, los cuales son transformaciones matemáticas que combinan diferentes bandas espectrales para resaltar características como el vigor, la biomasa y el contenido de clorofila (Xue y Su, 2017). En el caso de imágenes RGB, destacan índices como el TGI (Triangular Greenness Index), el VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) y el VGI (Vegetation Greenness Index), los cuales permiten estimar propiedades fisiológicas de la vegetación utilizando únicamente el espectro visible (Hunt et al., 2011; Gitelson et al., 2002; Qiao et al., 2022). La segmentación adecuada reduce la influencia de ruido, sombras y elementos externos, lo que mejora significativamente la calidad de los datos utilizados para el cálculo de índices de vegetación. En este sentido, aplicar algoritmos de segmentación y el cálculo de índices vegetales en imágenes digitales no solo representa una estrategia innovadora para evaluar su estado fisiológico, sino que también contribuye al desarrollo de sistemas de monitoreo no destructivos y de bajo costo.

Hipótesis

La segmentación de imágenes digitales mediante un algoritmo permite aislar de manera precisa los tallos de candelilla, lo que mejora la estimación de índices vegetales (VARI, TGI y VGI), los cuales se correlacionan con el comportamiento espectral del tejido vegetal.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Diseñar un algoritmo de segmentación de tallos de candelilla usando imágenes digitales de plantas colocadas en macetas y estimar los índices vegetales en plantas de candelilla.

1.2 Objetivo específico.

1. Recolecta de ejemplares de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*)
2. Captura de imágenes digitales del material vegetal de candelilla bajo condiciones estandarizadas de fondo, distancia, para conservar la información biológica del tejido foliar.
3. Preprocesar imágenes obtenidas mediante técnicas de filtrado y conversión a los espacios de color RGB y HSV, con el propósito de mejorar la calidad visual del tejido vegetal.
4. Segmentar automáticamente las imágenes del tejido vegetal de la candelilla para separar las regiones de interés del fondo y facilitar el análisis morfológico del material vegetal.
5. Estimación de índices vegetales, VGI, TGI y VARI

2.0 Revisión de Literatura.

2.1 Antecedentes de la candelilla.

La candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) se describió por primera vez en 1829 por Zuccarini debido a que noto que esta planta se emplea contra enfermedades venéreas (*sífilis*), dándole ese mismo año el nombre de (*Euphorbia antisyphilitica*) pero una nueva clasificación llegó por G. Alcocer en 1909 quien la nombro como *Euphorbia Cerifere* debido a sus propiedades para generar cera sin embargo el nombre utilizado actualmente es el de *Euphorbia antisyphilitica* por Zuccarini (Rojas et al., 2011)

2.2 Descripción de la Candelilla.

Se trata de una especie perenne con hábito de crecimiento fasciculado, caracterizada por la formación de macollos, cuya altura oscila entre 20 y 110 cm. Presenta tanto tallos aéreos como subterráneos. Los tallos aéreos exhiben una coloración verde que puede tornarse hacia tonalidades azuladas o violáceas, y muestran un patrón de ramificación simpódica. A nivel del periciclo se localizan conductos laticíferos, responsables de la secreción de un látex blanco, viscoso y adhesivo, el cual coagula al exponerse al aire. En estos mismos tallos se identifican poros ceríferos (Villa, 1981).

2.2.1 Hojas.

Son simples pudiendo ser alternas, opuestas o verticales, son sésiles con una longitud de 0.5 a 1 cm y de 1 a 2 mm de ancho, estas son de color rojizo oscuro y con pequeñas pubescencias de color blanco. La base axilar de la hoja provoca un color rojo, a esta se le denomina yema floral. Las hojas son poco visibles y en los adultos caducas, por permanecer solo de 15 a 20 días en la planta (García, 1988)

2.2.2 Tallo.

Los tallos aéreos son erectos y densamente compactos con ramificaciones donde los tallos más jóvenes tienen una longitud de 5-10 cm mientras que los tallos adultos llegan a tener una altura de 90-110 cm existe un gradiente cromático estos son temporales con una tendencia hacia el desplazamiento espectral desde el verde

blanquecino provocado por el recubrimiento de cera que produce hacia el violeta a medida que avanza el año y de la edad del tallo (Berrum, 2021).

Flores, (1995) reporta que el tallo promedio por año es de 6 a 15 cm de longitud, existiendo entre nudo y nudo dicho periodo; el crecimiento longitudinal tiene un límite, el cual, llegado el tallo, se suspende y entonces la planta forma nuevos tallos.

2.2.3 Flor

Se da comúnmente un aspecto de espiga de cabezuelas, se pueden encontrar flores de ambos sexos dentro de una estructura en forma de copa llamado ciato, contiene de 45 a 47 flores masculinas y una femenina al centro la que no se desarrolla en ciertas ocasiones cabe mencionar que no siempre se forma la inflorescencia tipo espiga si no que en ocasiones llegan a salir ciatos en un solo punto, siendo esta pequeña de 5 mm de diámetro, de pedúnculo corto, en su base presenta dos brácteas agudas de tonalidad más alta que los pétalos y en posición opuesta (Garcia, 1988).

2.2.4 Floración.

La especie presenta su fase de floración al inicio de la temporada de lluvias. En México, este periodo ocurre generalmente entre los meses de julio y agosto, mientras que, en la región del Big Bend, en Texas, se registra desde finales de abril hasta mediados de junio. No obstante, la fenología reproductiva está condicionada por la disponibilidad hídrica acumulada durante las precipitaciones invernales, lo que puede adelantar o retrasar el inicio de la floración en función del contenido de humedad almacenado en los tejidos de la planta. (Flores, 1995).

2.2.5 Raíz.

La candelilla presenta un sistema radical de tipo fasciculado con modificaciones tuberosas, caracterizado por su flexibilidad, consistencia fibrosa y una coloración que varía de grisáceo-parduzco a café rojizo. La raíz se encuentra recubierta por una capa suberosa y contiene abundante látex. A partir de este sistema radical se originan numerosas raíces secundarias, de morfología delgada y considerable longitud, las

cuales emergen en grupos desde distintas zonas del rizoma y presentan ramificación posterior a su punto de origen. (García, 1988).

2.2.6 Crecimiento.

La candelilla, al crecer en macollos, presenta una estrategia de crecimiento adaptable. Si bien el riego temprano favorece el desarrollo vegetativo, la planta está fisiológicamente programada para responder a condiciones de estrés hídrico. Bajo sequía, induce la producción de una capa cerosa que reduce la pérdida de agua. Esta respuesta adaptativa es similar a la observada en otras especies xerófitas como el guayule, donde se pueden implementar prácticas de manejo que combinen fases de crecimiento vegetativo vigoroso, seguidas de periodos de estrés hídrico para estimular la producción de metabolitos de interés, como la cera en el caso de la candelilla de acuerdo con la Comisión Nacional Forestal (2024).

2.2.7 Clima.

El clima es un factor determinante para el desarrollo de la planta según la clasificación de Köppen modificada por García (2004), corresponde principalmente al tipo BWk (clima desértico frío), y en zonas bajas al tipo BWh (clima desértico cálido). La precipitación media anual varía entre 150 y 400 mm, concentrándose en los meses de verano debido a la influencia del monzón. Las temperaturas oscilan entre máximas de hasta 45 °C en verano y mínimas que pueden descender por debajo de 0 °C en invierno, especialmente en áreas de mayor altitud. Estas condiciones generan una marcada amplitud térmica diaria y estacional, lo que influye en la adaptación de la flora, fauna y las actividades humanas en la región.

2.2.8 Adaptación a climas extremos.

La cera producida por la Candelilla es un metabolito secundario que ha evolucionado como una respuesta adaptativa a los ambientes áridos. Al crecer en regiones desérticas, donde el agua es escasa y las temperaturas fluctúan drásticamente, esta planta ha desarrollado la capacidad de transformar su savia en una capa cerosa

impermeable. Esta adaptación reduce la pérdida de agua por evapotranspiración, permitiendo a la Candelilla sobrevivir en condiciones climáticas extremas, caracterizadas por inviernos secos y fríos y veranos extremadamente calurosos (Luna *et al.*, 2016).

2.3 Distribución y Aprovechamiento.

2.3.1 Hábitat y Distribución.

La candelilla tiene una distribución geográfica que se extiende por el norte de México y el suroeste de Estados Unidos, Sin embargo, análisis espaciales realizados mediante algoritmos han revelado una distribución más amplia de esta especie mostrada en la figura 1, incluyendo regiones del centro y sur de México, como Oaxaca, Hidalgo y Puebla (Vargas *et al.*, 2020)

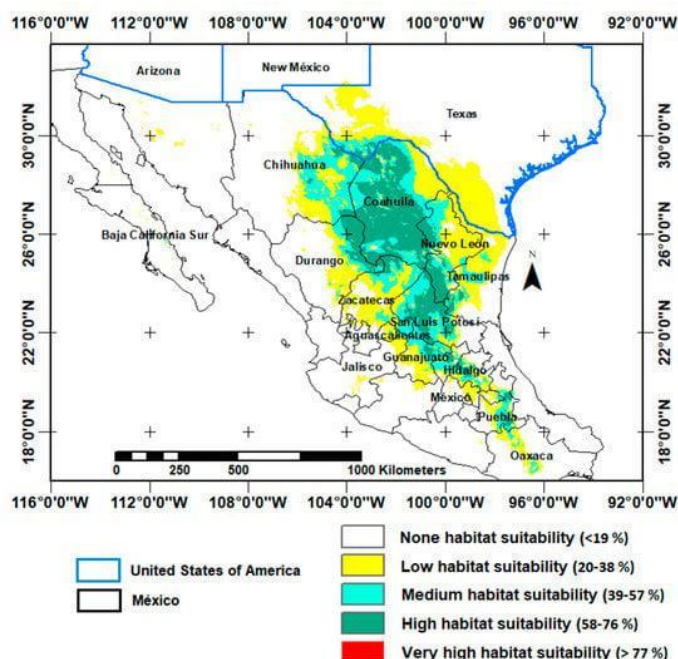


Figura 1. Distribución de la candelilla. (Vargas *et al.*, 2020)

2.3.2 Aprovechamiento

La cera de candelilla fue utilizada por primera vez por los indígenas prehispánicos del norte de México. Ellos la extraían hirviendo los tallos en recipientes de barro y la usaban para proteger las cuerdas de sus arcos y mezclarla con colorantes con fines

decorativos (Rocha et al., 2021), por lo cual el aprovechamiento de la planta se ha llevado a cabo desde hace más de cientos de años y ha sido un valioso recurso para las comunidades del norte del país gracias a sus beneficios curativos y económicos. El uso de la cera de candelilla tanto dentro como fuera del país tiene un gran uso industrial actualmente obteniendo productos tales como: velas, recubrimientos de frutos para su exportación, goma de mascar, fabricación de ceras para calzado, ungüentos, cosméticos, crayones, etc., este aprovechamiento ha llevado a que los “candelilleros” requieran permisos sustentados con estudios técnicos para su recolección señaló Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2022).

2.3.3 Recolección y época de corte.

Aunque la cera se produce todo el año su principal época de corte son en relación con los meses de enero a mayo, después de esos meses inician las lluvias de verano y estas ejercen un efecto negativo con la producción de cera y favoreciendo el desarrollo vegetativo (Martínez, 2013). La recolección de tallos consta de arrancar la planta con todo y raíz dejando en pie el 50% de los talluelos esto para favorecer su regeneración, se estima que su regeneración para volver a cosechar va de los 4 a 5 años y si las condiciones de lluvia son positivas (Martínez, 2024).

2.3.4 Factores climáticos que favorecen la plantación.

Se menciona que la mejor época de plantación es en los meses de marzo a julio donde da inicio la temporada de lluvia especialmente ya que este tipo de clima favorece el crecimiento de la planta (Romero et al., 2004).

2.3.5 Estados con mayor producción.

El aprovechamiento de cera de candelilla se ha vuelto una de las actividades fundamentales para la economía de las regiones del norte de México donde Coahuila se posiciona como el estado con mayor superficie y producción donde participa con alrededor de 80% de la producción nacional, siendo los municipios de Cuatro Ciénegas, Ocampo y sierra mojada los principales productores (Martínez, 2024)

2.5 Perspectivas del aprovechamiento.

Actualmente presenta una sobreexplotación por lo cual se ha ocasionado una significativa disminución de las poblaciones silvestres de candelilla asimismo es importante desarrollar e implementar tecnologías y prácticas sostenibles para un mejor aprovechamiento, dicho por Pérez (2014) la Agricultura 4.0 representa una oportunidad única para garantizar la conservación, productividad y competitividad del sector candelillero. Incorporar tecnologías como la inteligencia artificial, la segmentación de imágenes y el análisis predictivo no solo contribuye a maximizar la eficiencia del cultivo, sino que también protege la biodiversidad y mejora las condiciones sociales y económicas de las comunidades rurales dedicadas a esta actividad.

2.6 Uso de imágenes con tecnologías actuales para la agricultura

2.6.1 Análisis de imágenes en la agricultura

El análisis de imágenes en la agricultura juega un papel fundamental en la recopilación e interpretación de datos, convirtiéndose en una herramienta clave dentro de la tendencia conocida como “Agricultura 4.0”, que impulsa la integración de tecnologías inteligentes en distintos sectores productivos. Entre estas tecnologías destaca el desarrollo de plataformas de reconocimiento de imágenes combinadas con algoritmos de inteligencia artificial, los cuales son entrenados con grandes volúmenes de datos para identificar patrones y facilitar la toma de decisiones. Este proceso se lleva a cabo mediante cámaras que capturan imágenes, las cuales son posteriormente procesadas para extraer información relevante sobre el estado del cultivo (Justas, 2024).

En este contexto, el análisis de imágenes representa una alternativa prometedora y cada vez más utilizada para la evaluación del estado de las plantas, actividad que tradicionalmente se ha realizado mediante inspección visual. Esta tecnología permite realizar una evaluación objetiva y no destructiva, facilitando el monitoreo continuo del

crecimiento vegetal y proporcionando datos valiosos sobre tasas de desarrollo y etapas fenológicas. Además, se ha demostrado su utilidad para estimar parámetros fisiológicos como el índice de área foliar, el contenido de clorofila y la gravedad de enfermedades (Ibaraki y Gupta, 2015).

2.6.2 ¿Qué es una imagen?

Una imagen es una matriz representada de manera cuadriculada bidimensional de píxeles, denominadas imágenes rasterizadas. Tomando en cuenta las posiciones de cada imagen, estas son ubicadas por valores enteros positivos en un sistema de coordenadas cartesianas por otra parte una característica particular entre la imagen y las coordenadas cartesianas regulares es que el origen de la imagen, el píxel (0,0), se observa en la esquina superior izquierda de la imagen mientras que en cada coordenada un píxel representa el color en ese punto (Gupta e Ibaraki, 2014).

2.6.3 Píxel.

Un píxel representa el brillo y el color en ese punto. Aunque comúnmente se considera al píxel como una pequeña sección cuadrada de la imagen en parte debido a su similitud con los píxeles de visualización en los monitores de computadora en realidad, un píxel representa un punto muestreado de la imagen. Es decir, cada píxel corresponde a un único valor de color o nivel de intensidad asociado a una coordenada específica, en el análisis de imágenes en algunas ocasiones puede ser necesario calcular el valor de color o gris entre 2 píxeles, donde la representación del rectángulo sería inadecuada (Gupta e Ibaraki, 2014).

2.6.4 Espacios de color RGB.

La información en las imágenes a color corresponde al formato de RGB de 8 bits, donde el color es separado en tres componentes: rojo, verde y azul, donde se puede visualizar como un cubo tridimensional como se puede observar en la Figura 2, donde cada eje se representa por uno de los canales de color. El color negro se localiza donde los valores RGB son de (0,0,0) y el blanco se localiza en la esquina opuesta, con valores de 255, 255, 255. (Gupta e Ibaraki, 2014).

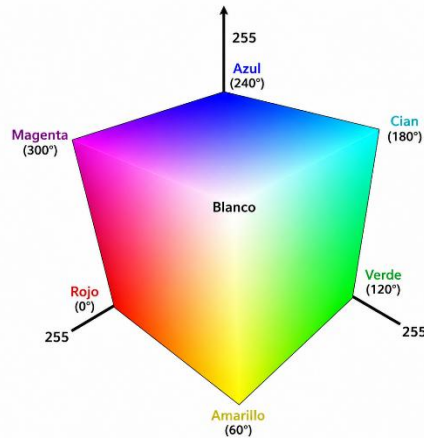


Figura 2. Ilustración sobre un cubo del Espacio de Color RGB. (Cortés et al., 2011)

2.6.5 Formato RGB.

El formato RGB es ampliamente utilizado debido a que coincide con la estructura de píxeles empleada en monitores y distintos tipos de pantallas. Sin embargo, una de sus principales limitaciones es que combina la información de color y brillo dentro del mismo espacio de color. Por esta razón, existen conversiones entre RGB y otros espacios de color que permiten separar el componente cromático del componente de luminosidad, transformando la imagen a un espacio donde ambas características puedan distinguirse de manera independiente. En ciertos casos, los píxeles se almacenan en bloques de 32 bits. Generalmente, un píxel está conformado por 24 bits correspondientes a los canales BGR y 8 bits adicionales que pueden permanecer sin uso. No obstante, en formatos como PNG, estos 8 bits extra suelen destinarse al canal alfa o de transparencia (Gupta e Ibaraki, 2014).

2.6.6 Espacio HSV

El espacio de color HSV por sus siglas en inglés (Hue, Saturation, Value) expone los elementos independientes de tono, saturación y valor de un píxel, HSV se observa fácilmente como un cilindro como se ve en la Figura 3, donde el tono representa la posición que se encuentra alrededor del borde, la saturación, la distancia del centro

al borde y el valor la posición de arriba abajo. En el modelo de color HSV (Hue, Saturation, Value), cada píxel se representa mediante tres componentes: tono, saturación y valor. El tono indica el tipo de color y se expresa en grados, dentro de un rango de 0° a 360° . Por ejemplo, a 0° el color es rojo, y conforme se avanza en la circunferencia de tonos, se transita por colores como azul y verde, hasta retornar nuevamente al rojo. La saturación se refiere a la pureza o intensidad del color. Los valores más altos representan colores intensos, mientras que valores cercanos al centro del modelo tienden hacia tonalidades grises, es decir, una menor expresión del color. Por su parte, el valor, también conocido como brillo, determina qué tan claro u oscuro es un color: los valores bajos se asocian a colores oscuros y se sitúan en la parte inferior del cilindro, mientras que los valores altos, correspondientes a colores claros, se ubican en la parte superior. Este modelo es particularmente útil en el procesamiento de imágenes, ya que permite una separación clara entre el componente cromático (H y S) y la luminosidad (V). A diferencia del modelo RGB, donde el color y la intensidad están estrechamente ligados, el HSV facilita la identificación de colores incluso bajo condiciones de iluminación variables, lo cual lo convierte en una herramienta más robusta para el análisis de imágenes en contextos cambiantes (Gupta e Ibaraki, 2014).

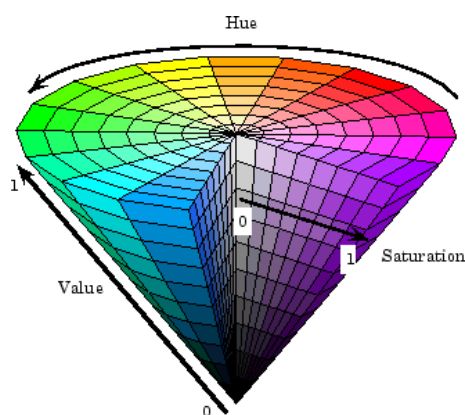


Figura 3. Espacio de color HSV (The MathWorks, 2026)

2.6.5 Análisis de imágenes.

Es el proceso de trabajar con datos de píxeles sin procesar para obtener información útil acerca de la imagen. Existen diversas técnicas que van de lo más complejo a lo

más sencillo tal como, el filtrado de imágenes que se usa a menudo para reducir o eliminar el ruido antes de su procesamiento por lo tanto la segmentación de imágenes permite ubicar regiones de interés, dividiendo el primer plano del fondo (Gupta e Ibaraki, 2014).

2.6.5.1 Filtrado de imágenes.

Una imagen con ruido de “sal y pimienta” se produce en todas las imágenes capturadas, debido a diversos factores siendo el principal el ruido electrónico natural, esto producen variaciones no deseadas en el color o la intensidad de los píxeles, que se alejan del color real del objeto observado por lo tanto el filtrado de imágenes es una forma eficiente de disminuir el ruido de una imagen, manteniendo al mismo tiempo aspectos importantes de la misma imagen (Gupta e Ibaraki, 2014).

2.6.7 Segmentación de imágenes.

Es un método de dividir los píxeles de una imagen en grupos donde: en cada grupo hay una diferencia significativa de los demás. La forma más sencilla de la segmentación dividiría los píxeles en 2 clases, donde una representa las áreas de interés de la imagen y la otra el fondo esto se suele lograr mediante la “umbralización” proceso que agrupa los píxeles según su intensidad o color (Gupta e Ibaraki, 2014).

2.7 Metodologías para el análisis de imágenes en objetos biológicos.

El flujo del análisis de imágenes especialmente en objetos biológicos se lleva de la siguiente manera.

1. Obtención de la imagen.
2. Preprocesamiento.
3. Extracción de rasgos característicos.

Una vez procesada, se seleccionan los píxeles correspondientes al objeto, se calculan las características de las áreas seleccionadas según su propósito (Ibaraki y Gupta, 2015).

2.7.1 Obtención de imágenes

Actualmente obtener imágenes digitales de objetos es un proceso accesible gracias a dispositivos como cámaras digitales, teléfonos móviles o cámaras conectadas a computadoras. Incluso las imágenes analógicas pueden digitalizarse mediante escáneres o convertidores analógicos-digitales. Una imagen digital está compuesta por píxeles, cada uno con un valor numérico que representa la intensidad de luz o color, conocido como nivel de gris o valor de píxel. Para el análisis de imágenes, es fundamental considerar propiedades como la resolución espacial, los niveles de gris, el sistema de color y el formato del archivo. Los formatos comprimidos como JPEG pierden información durante la compresión, mientras que formatos sin comprimir como BMP o TIFF conservan mejor la calidad, aunque generan archivos más grandes y requieren mayor procesamiento. Muchas cámaras incorporan controles automáticos, como el ajuste de ganancia y el balance de blancos, que pueden alterar la imagen y dificultar comparaciones entre capturas. Por ello, es importante verificar la linealidad entre la luz capturada y los valores de salida en los análisis de intensidad. Además, para facilitar la segmentación de los objetos de interés, se recomienda cuidar el fondo de la imagen utilizando colores contrastantes y evitar interferencias visuales con materiales como redes o soportes. Las condiciones de iluminación también son cruciales; en algunos casos, se emplean fuentes especiales como luz negra para destacar elementos específicos, como hojas en las plantas (Ibaraki y Gupta, 2015).

2.7.2 Preprocesamiento de imágenes.

Facilita la reducción de ruido de “sal y pimienta”, modificación de la resolución espacial, el número de niveles de gris y las conversiones del modo de color. En el procesamiento de imágenes digitales, la reducción de ruido es una etapa fundamental para mejorar la calidad de los datos antes del análisis. Para ello, se emplean

comúnmente filtros de suavizado, como el filtro de media móvil o el filtro gaussiano, los cuales calculan el valor promedio de los píxeles circundantes al píxel objetivo. Alternativamente, los filtros de mediana asignan al píxel central el valor mediano de su vecindad, siendo también eficaces en la eliminación de ruido impulsivo. En el caso de imágenes binarias, los procesos morfológicos de apertura y cierre son útiles para eliminar pequeñas irregularidades, como huecos o elementos no deseados (Ibaraki y Gupta, 2015).

2.7.3 Extracción de objetos de interés

La segmentación o umbralización es una etapa clave en el análisis de imágenes, que consiste en seleccionar los píxeles correspondientes a los objetos de interés para su posterior procesamiento. Uno de los métodos más utilizados es la umbralización mediante un valor fijo de nivel de gris, determinado a partir del histograma de la imagen. Este histograma representa la frecuencia de aparición de los distintos valores de píxel, permitiendo identificar objetos distintos como picos separados. (Ibaraki y Gupta, 2015). No obstante, el resultado de la segmentación puede presentar imperfecciones, como ruido, bordes irregulares o pequeñas regiones no deseadas. Para mejorar la calidad de los objetos segmentados y facilitar su análisis, se aplicaron operaciones morfológicas, específicamente erosión y dilatación. La erosión consiste en eliminar píxeles del contorno de los objetos segmentados, lo que permite reducir el ruido y eliminar pequeñas regiones aisladas que no forman parte del objeto de interés. Por otro lado, la dilatación agrega píxeles al contorno de los objetos, ayudando a rellenar huecos internos y a restaurar la forma de los objetos que pudieron verse reducidos durante la erosión. La combinación de ambas operaciones, conocida como apertura y cierre morfológico, se utilizó variando el tamaño del elemento estructurante (kernel) según las características de cada imagen, con el objetivo de obtener objetos mejor definidos, continuos y representativos del tejido analizado (González y Woods, 2018)

2.7.3.1 Índices vegetales

Los índices de vegetación son transformaciones matemáticas aplicadas a datos espectrales con el propósito de resaltar propiedades biofísicas de la vegetación, tales como vigor, biomasa y contenido de clorofila. Estos índices combinan diferentes bandas espectrales para maximizar la señal asociada a la vegetación y minimizar efectos externos como iluminación o suelo expuesto (Xue y Su, 2017).

Uno de los índices más utilizados es el NDVI por sus siglas en inglés (Normalized Difference Vegetation Index), que emplea las bandas roja e infrarroja cercana para estimar actividad fotosintética (Rouse et al., 1974). Sin embargo, cuando se trabaja con imágenes RGB convencionales, es necesario emplear índices derivados únicamente del espectro visible. Entre los índices visibles más utilizados se encuentran:

El TGI por sus siglas en inglés (Triangular Greenness Index) propuesto como un estimador indirecto del contenido de clorofila basado en la relación geométrica entre las bandas roja, verde y azul (Hunt et al., 2011).

El VARI por sus siglas en inglés (Visible Atmospherically Resistant Index), diseñado para reducir parcialmente los efectos atmosféricos y de iluminación, resaltando la señal del canal verde (Gitelson et al., 2002).

El VGI por sus siglas en inglés (Vegetation Greenness Index), que enfatiza la intensidad relativa del verde respecto a otras bandas visibles como indicador de verdor vegetal. Estos índices han demostrado ser útiles en agricultura de precisión, monitoreo de cultivos y evaluación del estado fisiológico de la vegetación mediante sensores digitales de bajo costo (Qiao et al., 2022)

2.7.3.2 Histogramas y Boxplot

El histograma es una herramienta gráfica que representa la distribución de frecuencias de una variable cuantitativa agrupada en intervalos. En el análisis de imágenes digitales, los histogramas permiten visualizar la distribución tonal de los valores de

intensidad en cada canal espectral (González y Woods, 2018). En estudios de vegetación, los histogramas se emplean para analizar la concentración de valores en rangos específicos, evaluar contraste, identificar posibles valores extremos y comprender la estructura estadística de los datos antes de aplicar análisis comparativos (Jähne, 2005). El diagrama de caja, introducido por Tukey (1977), es una representación gráfica que resume la distribución de una variable numérica mediante la mediana, los cuartiles y los valores extremos. Esta herramienta permite visualizar de forma clara la dispersión, asimetría y presencia de valores atípicos. En análisis de datos espectrales e índices de vegetación, los boxplots se utilizan para comparar la variabilidad entre diferentes tratamientos, clases o índices, facilitando la interpretación de diferencias estadísticas entre grupos (Montgomery y Runger, 2014).

2.8 Aplicaciones en plantas por medio de RGB

El color se usa como parámetro fundamental para medir la salud de las plantas, la calidad de los productos biológicos y los procesos agrícolas en general (Alchanatis et al., 1993, como se citó en Gupta, Ibaraki, y Trivedi, 2014) por ello las técnicas de RGB permiten detectar los cambios de color y ayudar directamente a monitorear el estado de desarrollo y la salud de las plantas entre otros.

2.8.1 Análisis multiescala de imágenes digitales para estimar el crecimiento de plantas ornamentales

Un ejemplo destacado del uso del procesamiento de imágenes en agricultura de precisión es el trabajo de Cásares et al. (2017), quienes desarrollaron un algoritmo para calcular el crecimiento de plantas ornamentales utilizando imágenes digitales procesadas a través de técnicas de reducción multi-escala. En su estudio, emplearon el lenguaje de programación Python y la biblioteca OpenCV para diseñar un sistema capaz de comparar una imagen modelo de una planta (“Flor del Desierto”) con otras imágenes tomadas en diferentes etapas de crecimiento. El algoritmo realiza reducciones sucesivas de escala sobre las nuevas imágenes y compara sus bordes con los de la imagen modelo hasta encontrar coincidencias. A través de esta

igualación se obtienen diferencias en píxeles RGB (rojo, verde, azul) que indican cambios físicos en la planta. Por ejemplo, se partió de una imagen base de 200 x 200 píxeles con un promedio de valores RGB de: R=180.41, G=186.715, B=191.435. En una imagen posterior de 398x354 píxeles, los valores cambiaron a R=181.78, G=186.17, B=187.93, lo que mostró una variación que se interpreta como crecimiento vegetal. Las diferencias obtenidas permitieron estimar porcentajes de cambio, siendo del 1.32% en el canal rojo, -3.43% en el verde y -0.54% en el azul. Este ejemplo demuestra cómo el uso de algoritmos y visión por computadora puede facilitar el monitoreo no invasivo del crecimiento de las plantas, reduciendo tiempos de muestreo y mejorando la precisión en viveros ornamentales.

2.8.2 Evaluación no destructiva de plantas almacenadas in vitro

Aynalem et al., (2006) propusieron una técnica de análisis de imágenes para evaluar la salud de las plántulas durante el almacenamiento de crecimiento lento, donde se compararon los resultados del sistema de imágenes digitales con las evaluaciones de visión estándar. Para el análisis digital, se capturaron imágenes en color de los dos primeros nodos de cada plántula, utilizando una cámara digital capaz de generar imágenes en formato RGB de 24 bits. A partir de estas imágenes, se extrajeron parámetros como los valores promedio de las bandas roja, verde y azul, el índice de vegetación normalizado modificado (MNDVI), la relación verde/rojo, y los componentes de tono, intensidad y saturación (HIS). El estudio se enfocó en cuatro cultivares de *Pyrus communis* L. seleccionados previamente por sus respuestas visuales diferenciadas. El procesamiento inicial de datos, incluyendo el cálculo de valores medios RGB y la conversión a HSI y MNDVI, se realizó utilizando Microsoft Excel como herramienta de análisis. Los valores RGB se convirtieron a tono, intensidad y saturación (HIS) y MNDVI ($R - V/R + V$) para su posterior análisis.

La salud de cada genotipo, según lo indicado por las puntuaciones de calificación visual de los cuatro genotipos, disminuyó a diferentes ritmos durante los 15 meses del período de monitoreo. A los 6 meses, los datos visuales habían disminuido de forma constante para *P. communis* cv. *Luscious* y *Bartlett-swiss* mientras que *de Belle*

lucrative y Louise Bonne de Jersey no mostraron disminuciones significativas hasta los 9 meses. Durante el periodo de 15 meses, se observaron correlaciones estadísticamente significativas entre las evaluaciones visuales y los índices G/R (verde/rojo) y MNDVI en todos los cultivares analizados. El análisis de regresión confirmó que tanto el MNDVI como la relación G/R presentaron variaciones significativas a lo largo del tiempo. En contraste, los valores correspondientes a intensidad, tono y saturación no mostraron correlaciones consistentes con las calificaciones visuales. Estos resultados respaldan el potencial del análisis digital de imágenes como herramienta objetiva para el monitoreo del estado fisiológico de plántulas durante el almacenamiento.

3.0 Materiales y Métodos

3.1 Recolecta y selección de ejemplares de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*)

La colecta del material vegetal se realizó en la localidad de Palma Gorda, perteneciente al municipio de General Cepeda (Figura 4), en el estado de Coahuila, México, en este sitio se recolectaron ejemplares de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) donde seleccionando plantas al azar en estado puro o silvestre destinadas al desarrollo del presente estudio. El área de colecta se localiza en las siguientes coordenadas geográficas: latitud 25.38143° (25° 22' 53" N) y longitud 101.16125° (101° 9' 41" O), a una altitud aproximada de 1,907 m s. n. m. Estas condiciones geográficas corresponden a una zona característica hábitat natural de la candelilla, las actividades experimentales y analíticas se realizaron en las instalaciones del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) en el municipio de Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México.



Figura 4. Colecta del material vegetal en la localidad de Palma Gorda

Posteriormente en CIQA fueron seleccionados esquejes de una altura de 15 a 18 cm colocando un promedio de 7 esquejes por maceta usando (Figura 5) y usando peat moss como sustrato con la finalidad de ayudar a retener agua y nutrientes y proporcionar un medio ideal para el enraizamiento de esquejes teniendo un peso total de 2kg por maceta a máxima retención de humedad del sustrato más los tallos de candelilla (Figura 6).



Figura 6. Selección de esquejes.



Figura 5. Plantación de esquejes

3.3 Captura de imágenes digitales del material vegetal de candelilla.

3.3.1 Fondo y distancia de tallo a cámara controlado.

Las imágenes digitales se tomaron a través de la cámara de un teléfono inteligente de la marca Samsung que contaba con un lente gran angular, equipada con un sensor de 50 MP, apertura F1.8, tecnología Dual Pixel AF, estabilización óptica de imagen (OIS) y un campo de visión (FOV) de 85°, con un tamaño de sensor de 1/1.56. Se uso un fondo de color azul, esto permitió reducir el ruido visual, es decir, eliminar elementos que no pertenecen a la muestra. Esto facilito la segmentación del área foliar, ya que el contraste entre la planta y el fondo homogéneo mejora la detección automática de los bordes y permite aislar únicamente la región de interés para su análisis mientras que

al mantener un a distancia controlada permitiendo que todas las imágenes se capturen bajo condiciones estandarizadas, lo cual mejoro la precisión del análisis.



Figura 7. Antes y después de aplicar el fondo azul

3.4 Preprocesamiento de imágenes obtenidas mediante técnicas de filtrado y conversión a los espacios de color RGB y HSV

3.4.1. Preprocesamiento de imágenes

El preprocesamiento de las imágenes se llevó a cabo utilizando el software R y la librería EBImage. Las imágenes se leyeron en formato JPG y se separaron en sus tres canales correspondientes al espacio de color RGB (rojo, verde y azul), los cuales fueron almacenados individualmente como matrices numéricas. Posteriormente, las imágenes fueron convertidas al espacio de color HSV (tono, saturación y valor) mostrado en la Figura 8 con el propósito de separar la información cromática de la intensidad luminosa y facilitar la discriminación entre la planta y el fondo utilizando las siguientes formulas propuestas por Efendi et al., (2024).

Las variables empleadas de las siguientes fórmulas que son los componentes de color de Hue (H), Saturation (S) y Value (V) apartir de colores RGB donde:

R (RED), G (Green), B (BLUE), representan las diferentes las diferentes intensidades de cada canal que van de 0 a 255 indicando desde su ausencia hasta su máxima presencia, mientras que; $\min(R, G, B)$ es una funcion matemática que determina el menor valor entre las intensidades de los canales rojo, verde y azul, esta variable se

utiliza en el cálculo de la saturación para su cuantificar la contribución mínima de los componentes cromáticos.

10^{-10} Es una constante numérica de valor muy pequeño incorporado en el denominador de la ecuación de saturación con el propósito de evitar errores de división entre cero durante el procesamiento.

$$H = \tan\left(\frac{\sqrt{3} * G, 2 * R - G - B}{2 * \pi}\right), \quad S = 1 - \frac{3}{R + G + B + 10^{-10}} * \min(R, G, B), \quad V = \frac{R + G + B}{3}$$

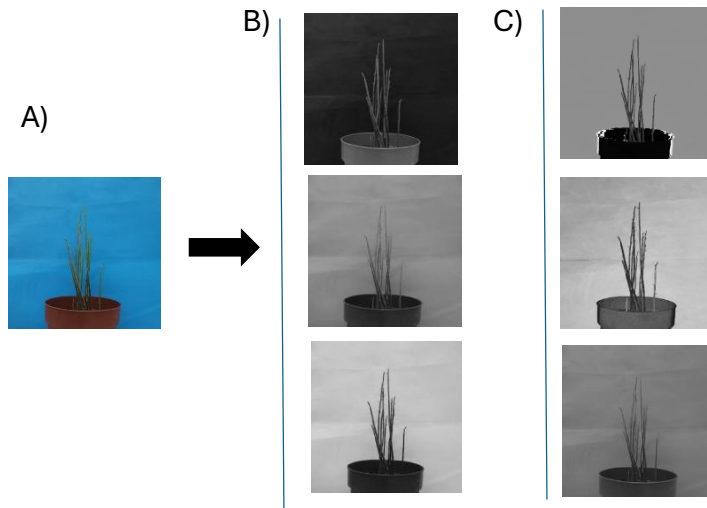


Figura 8. A) imagen original, B) Separación de canales en RGB, C) Separación de canales HSV

3.4.2 Generación de imágenes binarias y operaciones morfológicas

Una vez obtenidas las matrices correspondientes a los canales RGB y HSV, se generaron dos imágenes binarias que contenían la mayoría de los píxeles correspondientes a las hojas de candelilla. La primera imagen binaria se construyó seleccionando todos los píxeles cuyos valores en G fueran mayores a R y B, debido a que G representa el tejido vegetal mostrado en la Figura 9: la segunda imagen binaria se construyó seleccionando todos los píxeles cuyos valores V fueran mayores a H y S (Figura 9), debido a que el canal V representa la intensidad luminosa del píxel. En el

caso de la candelilla, los tallos presentan valores elevados de brillo como consecuencia de la reflexión de la luz sobre su superficie. Posteriormente con el fin de mejorar la selección de los píxeles correspondientes al tejido vegetal según fuera necesario aplicar operaciones morfológicas específicamente “*erosión*” y “*dilatación*”. La erosión se aplicó recorriendo la imagen binaria y colocando el *kernel* alrededor de cada píxel perteneciente al primer plano (*foreground*). Si alguno de los píxeles cubiertos por el *kernel* correspondía al fondo (*background*), el píxel central era convertido en fondo. Esta operación permitió reducir el tamaño de las regiones segmentadas y eliminar pequeños grupos de píxeles aislados que no correspondían al tejido vegetal, contribuyendo a la reducción de artefactos en la imagen y a la mejora de la definición de los contornos. Por otro lado, la dilatación correspondiente para cada píxel del fondo (*background*), se colocó una máscara alrededor de él; si cualquier píxel cubierto por la “máscara” pertenece al primer plano (*foreground*), entonces convierte ese píxel en primer plano, además, La combinación de ambas operaciones, variando el tamaño del *kernel* según las características de cada imagen, permitió obtener una segmentación.



Figura 9. Del lado izquierdo representa $V1 > H1$ & $V1 > S1$ el lado derecho $G1 > R1$ & $G1 > B1$

más precisa. Las imágenes binarias resultantes se combinaron en una sola imagen final, la cual se utilizó para recuperar los valores originales de los canales RGB y HSV correspondientes a los píxeles del objeto de interés. Finalmente, los píxeles correspondientes al tejido vegetal de la candelilla fueron etiquetados como “Clase_1”, mientras que los píxeles no pertenecientes a la planta se etiquetaron como “Clase_2”.

Con el fin de analizar la distribución de los valores digitales en cada canal espectral (R, G y B) y en los índices vegetales calculados, se generaron histogramas y diagramas de caja, donde permitieron evaluar la forma de la distribución, la concentración de datos.

3.4.3 índices vegetales.

Una vez validado el proceso de segmentación mediante el análisis de histogramas y diagramas de caja, se procedió al cálculo de índices vegetales con el objetivo de caracterizar el comportamiento espectral del tejido vegetal aislado de los cuales fueron seleccionados 3 importantes como, el VARI (Resistencia Atmosférica Visible), TGI (Índice Verde Triangular), VGI (Índice de Verdor de la Vegetación) (Cuadro 1).

Índice vegetal	Referencia
$TGI = G - 0.39R - 0.61B$	(Hunt et al., 2011)
$VARI = \frac{R - G}{G + R - B}$	(Gitelson et al., 2002.)
$VGI = \frac{B}{G}$	(Qiao et al., 2022)

Cuadro 1. Formula de índices vegetales

Estos índices fueron seleccionados debido a su capacidad para estimar vigor vegetal y contenido relativo de clorofila a partir de imágenes en el espectro visible, sin requerir información en el infrarrojo cercano. El índice TGI se empleó como estimador indirecto del contenido de clorofila, al cuantificar la relación entre las bandas roja, verde y azul mediante una aproximación geométrica al área triangular generada por sus intensidades. El índice VARI se utilizó para evaluar la dominancia del canal verde respecto al rojo, reduciendo parcialmente efectos de iluminación ambiental, lo que permite resaltar diferencias en cobertura vegetal dentro del rango visible. El índice VGI se calculó para analizar la relación entre las bandas verde y azul, proporcionando una medida adicional de intensidad de verdor en los tejidos evaluados.

Los valores de cada índice fueron obtenidos a partir de las bandas RGB previamente normalizadas y posteriormente analizados mediante estadísticos descriptivos (mínimo, máximo, media, mediana y cuartiles) con el fin de caracterizar su distribución.

3.5 Procesamiento de imágenes digitales.

A partir de las imágenes segmentadas permitió el inicio de la construcción de una base de datos robusta para el entrenamiento y validación de un modelo de clasificación para cada píxel, los valores de los canales RGB y HSV, así como su respectiva etiqueta de clase.

4. Resultados

4.1 Recolecta y selección de ejemplares de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*)

Como resultado del proceso de recolección y selección del material vegetal, se trabajó con un total de 45 macetas que contenían esquejes de candelilla, los cuales fueron utilizados para el análisis digital de imágenes durante el periodo de estudio que fue de 6 meses.

4.2 Captura de imágenes digitales del material vegetal de candelilla.

Las imágenes digitales obtenidas presentaron un alto contraste entre el material vegetal y el fondo, lo que permitió una clara delimitación de los esquejes de candelilla. El uso de un fondo homogéneo favoreció la reducción del ruido visual, eliminando elementos ajenos a la muestra y facilitando la segmentación automática de la región de interés. Asimismo, el control de la distancia entre el tallo y la cámara permitió obtener imágenes uniformes y comparables entre sí, lo que contribuyó a una mayor consistencia en el análisis digital y a una mejora en la precisión de los resultados obtenidos.

4.3 Preprocesamiento de imágenes obtenidas mediante técnicas de filtrado y conversión a los espacios de color RGB y HSV

El diagrama presentado en la Figura 10 resume el flujo general del procesamiento y análisis digital de las imágenes de candelilla, desde la adquisición de las imágenes hasta la obtención de los datos finales para su análisis. En la primera etapa se muestra la imagen original con mejor calidad visual y mayor contraste entre el material vegetal y el fondo. Posteriormente, el diagrama ilustra la separación de los canales correspondientes a los espacios de color RGB y HSV, lo que permitió resaltar las características del tejido vegetal. A partir de esta información se generaron imágenes binarias, en las que se observa una clara diferenciación entre los píxeles correspondientes a la planta y aquellos asociados tanto al fondo como a la maceta. Asimismo, se muestra el efecto de las operaciones morfológicas aplicadas a la imagen segmentada obteniendo una mejora en la definición de los esquejes de candelilla, de manera complementaria al flujo de trabajo ilustrado en la Figura 10, se realizaron análisis estadísticos mediante histogramas y diagramas de caja (Boxplot), con el fin de evaluar estadísticamente el desempeño del procedimiento.

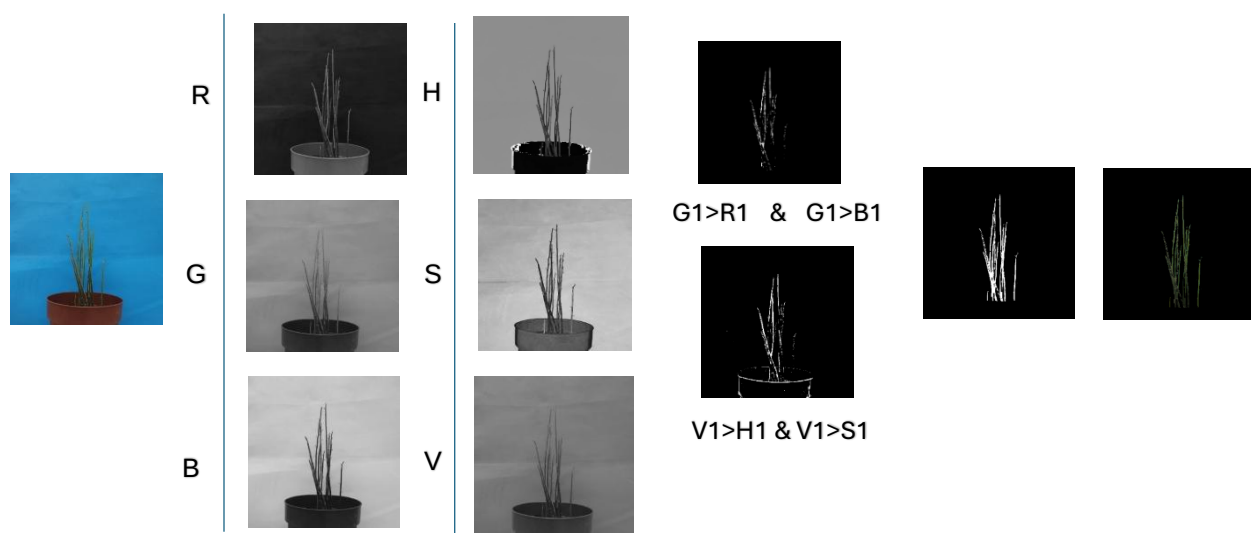


Figura 10. Diagrama de flujo del procesamiento de imágenes del trabajo

En la figura 11 se presentan los histogramas de intensidad correspondientes a tres canales (RGB) de la imagen antes del proceso de segmentación. Se observa que cada canal presenta una distribución distinta de valores. El canal rojo concentra una mayor frecuencia de píxeles en intensidades bajas, con un pico pronunciado cercano a 0 y una rápida disminución hacia valores mayores, lo que indica predominio de tonos oscuros en este canal. El canal verde muestra una distribución más centrada, con un pico alrededor de valores medios (aproximadamente 0.50), lo que sugiere una mayor presencia de intensidades intermedias. Por su parte, el canal azul presenta un comportamiento desplazado hacia intensidades altas, con un pico notable cercano a 0.70–0.80, indicando que este canal domina en regiones más claras de la imagen, donde también concentra una mayor frecuencia de píxeles con un pico superior a 10. En conjunto, las distribuciones no son uniformes ni similares entre sí, evidenciando heterogeneidad en la composición cromática de la imagen original. Por ejemplo, González y Woods (2018) señalan que, en imágenes digitales sin procesar, los histogramas de los canales RGB suelen presentar un alto grado de solapamiento debido a que los valores de intensidad incluyen información tanto de las plantas como del fondo, así como variaciones ocasionadas por condiciones de iluminación del entorno. Los histogramas de intensidad de los canales de color permitieron analizar la distribución de los valores de los píxeles presentes en la imagen y evaluar el efecto del proceso de segmentación sobre la información visual.

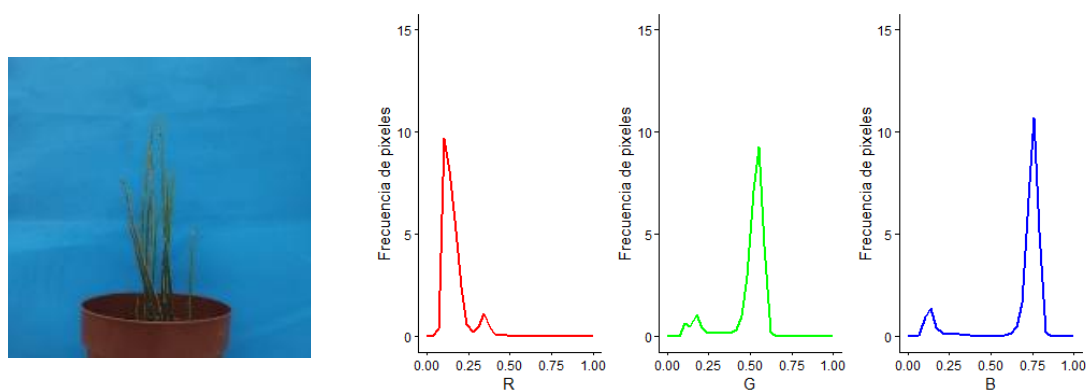


Figura 11. Histograma de la imagen original

Tras la aplicación del proceso de segmentación se puede observar que en el canal rojo se observa una concentración principal de valores en un rango aproximado de 0.15 a 0.40, con un pico alrededor de 0.25–0.30. La distribución presenta una ligera asimetría hacia la derecha, lo que sugiere la presencia de algunas intensidades mayores, aunque en menor proporción. Este comportamiento es consistente con la menor reflectancia del rojo en tejido vegetal.

En el canal verde la distribución se encuentra más concentrada y definida, principalmente entre 0.20-0.45, con un máximo cercano a 0.30–0.35. Este patrón indica una mayor estabilidad y predominancia del canal verde, lo cual es característico de la vegetación, ya que este canal captura con mayor precisión la respuesta espectral asociada a la clorofila. La menor dispersión respecto a otros canales sugiere que la segmentación logró aislar adecuadamente el tejido vegetal.

Por su parte, el canal azul presenta una distribución más asimétrica, concentrada en valores bajos, aproximadamente entre 0.10 y 0.30, con una cola prolongada hacia valores mayores. Este comportamiento indica una menor contribución del canal azul en la representación de la vegetación, así como una mayor sensibilidad a variaciones de iluminación o ruido residual. En conjunto, las tres distribuciones reflejan una reducción de la variabilidad y de los valores atípicos, lo que confirma que la segmentación eliminó gran parte de la información no deseada (fondo) y conservó principalmente los píxeles asociados a la planta. Asimismo, la mayor concentración y definición de los histogramas, especialmente en el canal verde, evidencia una mejora en la calidad de la información espectral, permitiendo una caracterización más precisa de la vegetación segmentada.

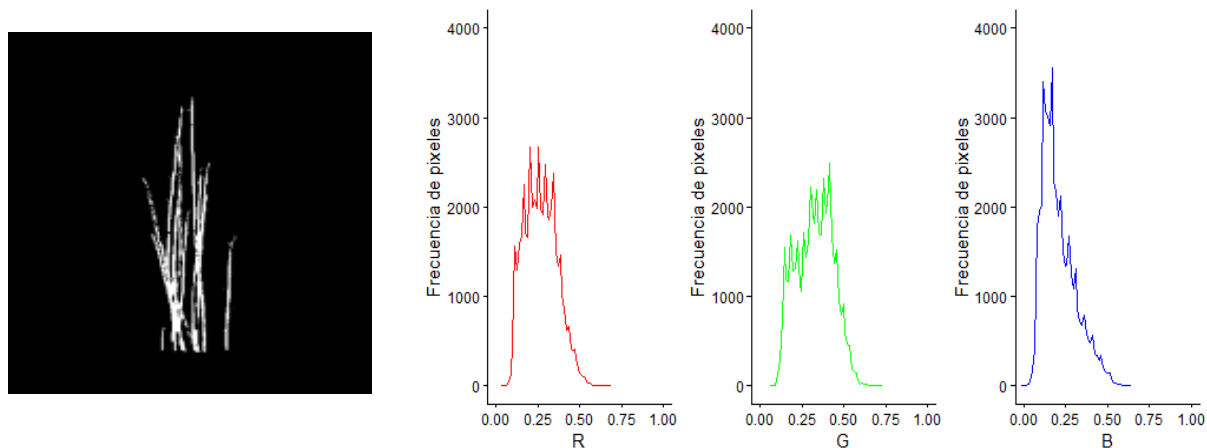


Figura 12. Histograma de la imagen segmentada.

Mientras que los boxplots representan la distribución de la intensidad de los píxeles en cada canal de color de la imagen segmentada, mostrando la mediana, el rango intercuartílico y la presencia de valores atípicos.

La Figura 10 muestra la comparación de los diagramas de caja correspondientes a los canales rojo (R), verde (G) y azul (B) para la imagen original y la imagen segmentada. En la imagen original, los boxplots presentan una mayor dispersión en los tres canales, lo que refleja la coexistencia de píxeles pertenecientes tanto a la planta como al fondo, así como la influencia de variaciones de iluminación. En particular, el canal azul exhibe valores de intensidad más elevados y una variabilidad considerable, asociada al fondo predominante en la escena. Tras el proceso de segmentación ilustrado en la Figura 13, se observa una reducción notable en la dispersión de los valores de intensidad, así como una mayor concentración alrededor de la mediana en los tres canales. El canal verde mantiene una mediana superior respecto a los canales rojo y azul, lo cual concuerda con la respuesta espectral característica de la vegetación. Estos resultados indican que la segmentación permitió aislar de manera efectiva los píxeles correspondientes a la planta, reduciendo la influencia del fondo y mejorando la homogeneidad cromática del tallo.

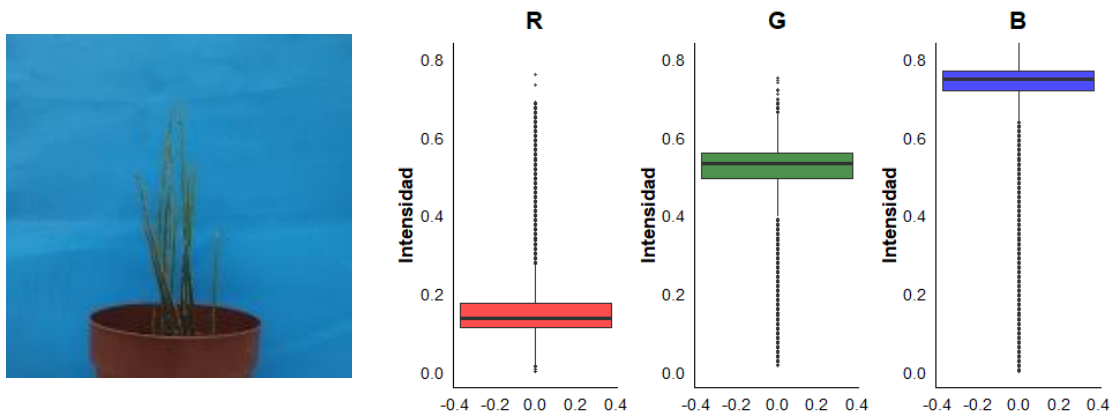


Figura 13. Boxplot de la imagen antes de segmentar

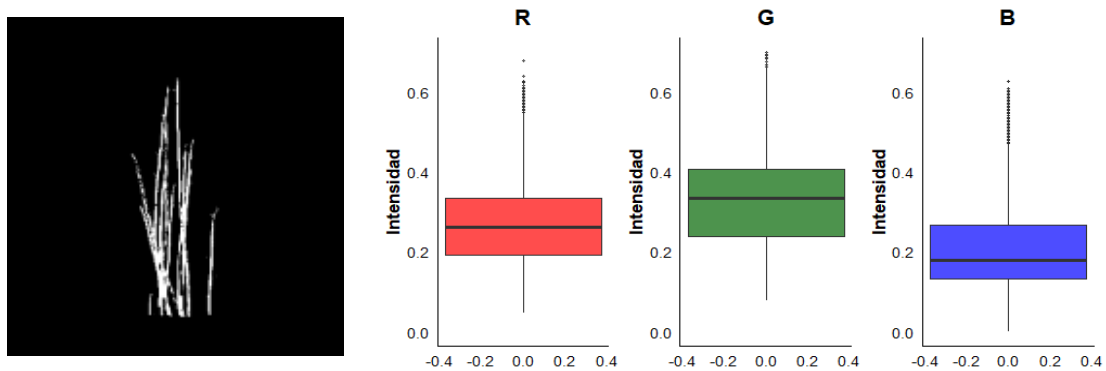


Figura 14 Boxplot de la imagen segmentada

4.4 Índices vegetales

Una vez validado el proceso de segmentación mediante el análisis de histogramas y diagramas de caja, se procedió al cálculo de índices vegetales con el objetivo de caracterizar el comportamiento espectral del tejido vegetal aislado, de los cuales fueron seleccionados 3 más importantes VARI (Resistencia Atmosférica Visible), TGI (Índice Verde Triangular), VGI (Índice de Verdor de la Vegetación) reflejado en la figura 15, a diferencia de índices que requieren bandas del infrarrojo cercano, estos índices utilizan combinaciones de los canales rojo, verde y azul.

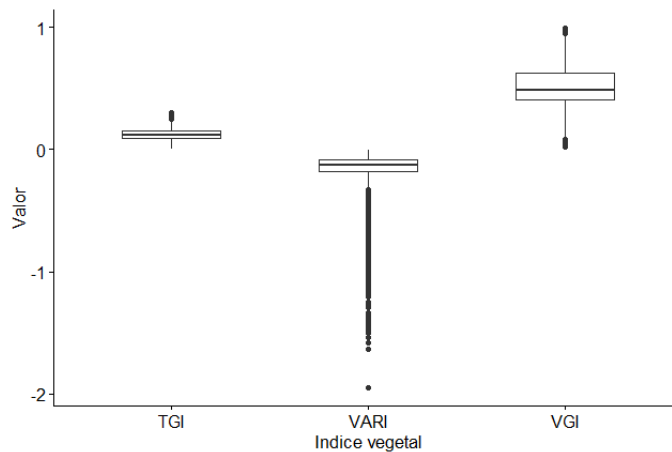


Figura 15 Índices vegetales calculados

Los valores obtenidos para el índice TGI oscilaron entre 0.005 y 0.297, con una mediana de 0.118. En índices derivados de imágenes RGB, valores positivos en este rango se asocian con presencia de vegetación y contenido moderado de clorofila. La concentración de los datos en valores intermedios sugiere que los esquejes presentan actividad fotosintética detectable, aunque no corresponden a vegetación densa o frondosa. En comparación con lo reportado en la literatura, el TGI ha sido ampliamente relacionado con el contenido de clorofila y la actividad fotosintética, mostrando valores más altos en cultivos con mayor vigor vegetal (Gerardo y P. de Lima, 2023)

Esto puede explicarse debido a que la candelilla presenta una morfología xerófito, donde la fotosíntesis ocurre en tallos y no en hojas amplias, lo que limita la intensidad de la señal verde y, por tanto, reduce los valores del índice en comparación con cultivos convencionales.

En el caso del índice VARI, los valores se mantuvieron en el rango negativo (-1.95 a -0.003), con una mediana de -0.125. En términos espectrales, valores negativos indican que la reflectancia en el canal verde no supera ampliamente al canal rojo, lo cual puede asociarse a estructuras vegetales no frondosas, presencia de sombras o características propias del tallo. Al comparar con otros autores, el VARI ha sido utilizado principalmente para estimar cobertura vegetal, donde valores positivos

suelen asociarse con vegetación densa y bien desarrollada (Gerardo y P. de Lima, 2023). Por lo tanto, el comportamiento negativo observado en este estudio contrasta con dichos reportes, pero no implica ausencia de vegetación. Esta diferencia se explica por la estructura particular de la candelilla, cuyos tallos delgados, cerosos y con menor área fotosintética generan una respuesta espectral distinta. Además, factores como sombras, iluminación y fondo del suelo pueden influir en la disminución del índice, haciendo que el VARI no sea tan representativo en este tipo de vegetación.

Por su parte, el índice VGI presentó valores entre 0.027 y 0.995, con una mediana de 0.631 y una media de 0.628. Estos valores intermedios-altos indican una predominancia del canal verde respecto al azul, lo que confirma la presencia de tejido vegetal activo. La amplitud observada en el rango sugiere variaciones internas en iluminación y estructura del tallo, pero mantiene una tendencia consistente hacia comportamiento vegetal.

De acuerdo con la literatura, los índices de verdor basados en RGB se fundamentan en la dominancia del canal verde respecto a otros canales, lo cual permite identificar vegetación activa (Meyer & Neto, 2008). Asimismo, el VGI ha sido utilizado como una medida del grado de verdor visible o cobertura vegetal percibida, donde valores más altos reflejan mayor presencia de vegetación (Wang et al., 2021). En este sentido, los valores obtenidos coinciden con lo reportado, ya que reflejan una señal clara de vegetación, aunque con variabilidad interna. Esta variación puede atribuirse a la heterogeneidad en la iluminación, orientación de los tallos y condiciones superficiales, lo cual es común en imágenes RGB y afecta directamente la intensidad de los canales de color.

5. Conclusión.

El presente estudio permitió diseñar y validar un algoritmo de segmentación de imágenes digitales aplicado a tallos de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*), demostrando su utilidad para la estimación de índices vegetales derivados del espacio de color RGB.

Por otra parte, en conjunto, los resultados confirman que los índices vegetales obtenidos a partir de imágenes segmentadas se correlacionan con las características espectrales del tejido vegetal, validando la hipótesis planteada. Finalmente, este trabajo destaca el potencial del análisis de imágenes digitales como una herramienta accesible y no destructiva para la evaluación de especies xerófitas, especialmente de la candelilla contribuyendo al desarrollo de metodologías que pueden apoyar el monitoreo y manejo sustentable del cultivo de la candelilla en el Desierto Chihuahuense.

6. Referencias.

- Alvarado, C. J. C., Sáenz Galindo, A., Barajas Bermúdez, L., Pérez Berumen, C., Ávila Orta, C., & Valdés Garza, J. A. (2013). *Cera de candelilla y sus aplicaciones*. *Avances en Química*, 8(2), 105–110.
- Aynalem, H. M., Righetti, T. L., & Reed, B. M. (2006). Evaluación no destructiva de plantas almacenadas *in vitro*: una comparación del análisis visual y de imágenes. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 42(6), 562–567.
- Berrum, A. D. (2021). *Caracterización fisicoquímica y funcional de la planta de candelilla (Euphorbia antisiphilitica Zucc.) en diferentes localidades* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Cabello, A. C. J., Sáenz, G. A., Barajas, B. L., Pérez, B. C., Ávila, O. C., & Valdés, G. J. A. (2013). *Cera de candelilla y sus aplicaciones*. Universidad Autónoma de Coahuila.
- Canales, E., Canales, M. V., & Zamarrón, E. M. (2006). Candelilla, del desierto mexicano hacia el mundo. *Biodiversitas*, 69, 1–5.
- Cásares, F. C. A., Farías, M. N., García, D. N., & García, R. A. (2017). Procesamiento de imágenes de plantas ornamentales multi-escala para calcular su crecimiento. *3C TIC*, 6(3), 10–25. <https://doi.org/10.17993/3ctic.2017.57.10-25>
- Comisión Nacional Forestal. (2024). *Euphorbia antisiphilitica Zucc.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.conafor.gob.mx>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2022). *Guía informativa para la elaboración de estudios técnicos de aprovechamiento sustentable de candelilla*. <https://www.biodiversidad.gob.mx>
- Cortés, O. J. A., Ardila, U. W., & Mendoza J. A. (2011). Técnicas alternativas para la conversión de imágenes a color a escala de grises en el tratamiento digital de imágenes. *Scientia et Technica*, 17(47), 1–6.
- Efendi, A. M. A., Sriani, S., & Hasibuan, M. S. (2024). Classification of watermelon ripeness levels using HSV color space transformation and K-nearest neighbor method. *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing*, 6(3), 934–948. <https://doi.org/10.47709/cnahpc.v6i3.3999>
- Flores, L. C. (1995). *Viabilidad de semillas, emergencia de plántulas y plantaciones de candelilla* (Tesis profesional). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5ª ed.). UNAM.

- García, G. R. (1988). *Respuesta vegetativa de la candelilla bajo diferentes sistemas de cosecha* (Tesis profesional). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Gerardo, R., & P. de Lima, I. (2023). Applying RGB-Based Vegetation Indices Obtained from UAS Imagery for Monitoring the Rice Crop at the Field Scale: A Case Study in Portugal. *agriculture*, 5-6.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87.
- González, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson.
- Govea, M. (2018). *La candelilla: La última esperanza de algunos pueblos del desierto*. Secretaría del Medio Ambiente. <https://sma.gob.mx>
- Granados, S. D., Sánchez, G. A., Granados, V. R. L., & Borja, R. A. (2011). Ecología de la vegetación del desierto chihuahuense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(spe), 111–130. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.10.102>
- Gupta, S. D., Ibaraki, Y. (Eds.). (2014). *Plant image analysis: Fundamentals and applications*. CRC Press.
- Gupta, S. D., Ibaraki, Y., y Trivedi, P. (2014). Applications of RGB color imaging in plants. En S. D. Gupta & Y. Ibaraki (Eds.), *Plant image analysis* (pp. 41–62). CRC Press.
- Hunt, E. R., Daughtry, C. S. T., Eitel, J. U. H., & Long, D. S. (2011). Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. *Agronomy Journal*, 103(4), 1090–1099. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0395>
- Ibaraki, Y., & Gupta, S. D. (2015). Image analysis for plants: Basic procedures and techniques. En *Plant image analysis*. CRC Press.
- Jähne, B. (2005). *Digital image processing*. Springer.
- Justas. (2024). *Reconocimiento de imágenes y IA en la producción agrícola*. Visionplatform. <https://visionplatform.ai>
- Luna, E. V., Barriada, L. G., López, D. S., Villa, F. C., & Medrano, J. R. M. (2016). Efecto de condiciones de estrés abiótico sobre la producción de cera en candelilla. *Revista Latinoamericana de Química*, 44, 7.
- Marroquín, J. S., Borja, G., Velázquez, R., et al. (1981). *Estudio ecológico dasonómico de las zonas áridas del norte de México*. INIF.
- Martínez, D. A. (2024). *Manejo, aprovechamiento e innovación para la producción de cera de candelilla*.
- Martínez, S. M. (Ed.). (2013). *Ecología y usos de especies forestales de zonas áridas*. INIFAP.

- Meyer, G. E., & Neto, J. C. (2008). Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.03.009>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). *Applied statistics and probability for engineers* (6th ed.). Wiley.
- Pérez, L. J. G. (2014). *Aprovechamiento de la cera de candelilla* (Monografía). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Pronatura Noreste. (2017). *Desierto Chihuahuense*. <https://www.pronaturanoreste.org>
- Qiao, L., Zhao, R., Tang, W., et al. (2022). Estimating maize LAI using UAV imagery. *Field Crops Research*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108739>
- Rojas, M. R., de León, Z. M. A., Jasse, C. D., & Aguilar, N. C. (2011). Pasado, presente y futuro de la candelilla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*.
- Romero, M. A., & Ortega, E. H. (Coords.). (2004). *Zonas áridas y semiáridas de México*. Plaza y Valdés.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains*. NASA.
- Soto, G. B. M. (2010). *Germinación de candelilla* (Tesis). UANL.
- The MathWorks, Inc. (2026, abril 14). *Convertir entre espacios de color RGB y HSV*. <https://la.mathworks.com/help/images/convert-from-hsv-to-rgb-color-space.html>
- Vargas, P. G., Valdez, C. R. D., López, S. A., et al. (2020). Distribución potencial de candelilla. *Bosques*.
- Villa, S. A. B. (1981). Investigación sobre la candelilla. *Ciencia Forestal*, 6, 4–11.
- Villanueva, J., et al. (2011). *La candelilla: ecología, aprovechamiento y manejo*. UAAAN.
- Wang, R., et al. (2021). Visible green index and vegetation structures. *Urban Forestry & Urban Greening*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127299>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Remote sensing vegetation indices: A review. *Journal of Sensors*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>