

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

**Sistema de procesamiento de imágenes RGB aéreas para
agricultura de precisión**

Tesis presentada en opción al grado de
Ingeniero en Automática

Autor: Anniel Martinez Rodríguez.

Tutores: Dr.C. Alain S. Martínez Laguardia.
Ing. Samy Kharuf Gutiérrez.

Santa Clara
2016
“Año 57 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

**Sistema de procesamiento de imágenes RGB aéreas para
agricultura de precisión**

Tesis presentada en opción al grado de
Ingeniero en Automática

Autor: Anniel Martínez Rodríguez.

annielm@uclv.cu

Tutor: Dr. Alain S. Martínez Laguardia.

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

email: amlaguardia@uclv.edu.cu

Ing. Samy Kharuf Gutiérrez.

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

email: kharuf@uclv.cu

Santa Clara
2016
“Año 57 de la Revolución”



Hago constar que el presente PROYECTO DEL TRABAJO DE DIPLOMA fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podría ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Anniel Martinez Rodríguez
Autor

Fecha

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Anniel Martinez Rodríguez
Autor

Fecha

Iván Santana Chin, Dr.
Jefe del Departamento

Fecha

Responsable ICT o J' de Carrera, (Dr., M.Sc. o Ing.)
Responsable de Información Científico-Técnica

Fecha

PENSAMIENTO

"Ver después no vale, lo que vale es ver antes y estar preparados..."

José Martí

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres y mi tío que se han encargado de que pueda ser lo que soy hoy.

A mi novia que desde que la conocí me ha llenado de amor y felicidad.

A mis amigos que siempre me tienden la mano en las buenas y en las malas.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que hicieron posible que yo transitara el camino para convertirme en un profesional.

En especial a mi familia, mis padres y mi tío, que me lo han dado todo para que yo pudiese estudiar. A mi novia que siempre ha estado a mi lado y me ha hecho esforzarme por un futuro. Agradecer a los familiares de mi novia, mi segunda familia, los que siempre me han apoyado y me han impulsado a estudiar. Un agradecimiento muy especial a mi concuño que me ha guiado en cada paso de esta tesis, la cual logré realizar con su ayuda. Agradezco a mis amigos y compañeros, Idel, Ernesto, Danilo, Relman, Yassel, Loan y demás que han estado compartiendo conmigo estos cinco años. Y agradezco a mis tutores y de forma general a todos los profesores de la Facultad de Automática que estaban presentes justo en el momento que los necesitaba.

Resumen

Las técnicas de Teledetección de Alta Resolución son muy empleadas en la Agricultura de Precisión, a través de ella se pueden determinar diferentes parámetros de interés agrícola. En esta investigación se logra determinar la cobertura vegetal y salud en cultivos de caña de azúcar, mediante la captura de las imágenes RGB y su posterior procesamiento. Los vehículos aéreos no tripulados son capaces de tomar imágenes con buena calidad y además son una solución económicamente viable. El vehículo aéreo USENSE X8 fue el utilizado en este trabajo. Seleccionar un software para el procesamiento de las imágenes capturadas por este vehículo es un punto clave para la extracción de información. Para determinar estos parámetros de interés relacionados con el crecimiento se empleó la librería OpenCV con el software Visual Studio Express 2013. El procesamiento se basa en la segmentación por color, aprovechando el color verde del cultivo para identificarlo de los demás elementos y determinar si es saludable. Con esto se obtiene información que permite tomar decisiones para aumentar el rendimiento, con un ahorro de insumos agrícolas.

Palabras Clave: Software, Imágenes RGB, Procesamiento Digital de Imágenes.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES EN LAS APLICACIONES AGRÍCOLAS.	5
1.1 Introducción	5
1.2 Toma de imágenes por vehículos aéreos no tripulados UAV	5
1.3 Aplicaciones de los software de procesamiento digital de imágenes en Agricultura de Precisión.	7
1.3.1 El software ENVI	8
1.3.2 Las librerías AForge.NET y OpenCV, su uso con el Visual Estudio	9
1.3.3 El software eCognition.....	12
1.3.4 El software MATLAB	13
1.3.5 El software ImageJ.....	14
1.3.6 Comparación de los software	15
1.4 Consideraciones finales del capítulo	18
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
2.1 Introducción.....	20
2.2 Materiales para la captura de las imágenes aéreas.....	20
2.2.1 Componentes del UAV USENSE-X8.....	20
2.2.2 Cámara Canon S100 (Figura 2–5):.....	22
2.3 Características de los software	22
2.3.1 Librería OpenCV.....	23
2.3.2 Software MATLAB.....	25
2.3.3 Librería AForge.NET	27
2.3.4 Selección del software adecuado para el procesamiento.....	28
2.4 Elaboración del plan de vuelo	29
2.4.1 Chequeo previo al vuelo	29
2.4.2 Software a utilizar para realizar el plan de vuelo	31
2.5 Método para el procesamiento.....	33
2.6 Consideraciones finales del capítulo	35
CAPÍTULO 3. SISTEMA PARA DETERMINAR LA COBERTURA Y SALUD VEGETAL EN PLANTACIONES DE CAÑA DE AZÚCAR.	
RESULTADOS OBTENIDOS	37
3.1 Introducción	37
3.2 Procedimiento para la toma de las imágenes aéreas	37
3.3 Aplicación del método.....	38
3.4 Resultados obtenidos	43
3.5 Determinar zonas con buen estado de salud	46
3.6 Análisis económico	47
3.7 Consideraciones finales del capítulo	48
CONCLUSIONES.....	49
RECOMENDACIONES.....	51
TRABAJO FUTURO	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los cultivos agrícolas ocupan grandes áreas, por lo cual el mapeo de las plantaciones, la detección de plagas y malas hierbas y determinación de la cobertura vegetal tienen gran complejidad, pero debe ejecutarse con alto rigor para que la producción tenga rendimientos favorables. Debido a esto el hombre se ha dado a la tarea de incorporar en la agricultura técnicas de Teledetección de Alta Resolución y procesamiento de imágenes mediante cómputo. Así, la agricultura actual ha alcanzado un gran desarrollo por lo cual ha surgido el término Agricultura de Precisión.

La Agricultura de Precisión se ha convertido en un concepto agronómico cada día más difundido cuya aplicación contribuye al uso eficiente de los insumos, el aumento de la producción agrícola y el cuidado del medio ambiente. El uso de nuevas tecnologías ha permitido que los productores, en diversos países desarrollados, accedan a nuevos mercados internacionales avalados por la calidad de sus productos. Esta mejora en la calidad se ha logrado teniendo una mejor gestión de los cultivos (Balcázar, 2011).

El procesamiento de imágenes RGB tomadas por vehículos aéreos no tripulados ha sido empleado en numerosas aplicaciones. Los vehículos aéreos no tripulados UAV, junto con los avances en el desarrollo de microsensores, posibilita un nuevo concepto de Teledetección de Alta Resolución superando ciertas limitaciones en los tres niveles de resolución (espacial, espectral y temporal). Además es una solución económicamente viable (Díaz J., 2015).

Las imágenes tomadas desde los UAV tienen ventajas respecto a las tomadas desde los satélites, en cuanto a costo, no interposición de nubes y mayor cercanía al objetivo. Además los UAV son capaces de llevar a cabo misiones automáticamente. Permitiendo la toma de imágenes con diferente tipo de sensores tales como cámaras fotográficas (Sensor RGB), cámara de video, cámaras térmicas, cámaras multispectrales, cámaras hiperespectrales, pudiéndose modificar desde tierra, la posición de la cámara desde la vista cenital a la perspectiva general (Díaz J., 2015).

Las imágenes se llevan al software de procesamiento digital, que permite consolidar los datos de distintos canales espectrales en imágenes capaces de comunicar más información acerca del crecimiento, salud, maleza presente y estado del riego en los cultivos agrícolas (2010). De esta manera, se extrae información del mundo real automáticamente a partir de una imagen observada (Rosales, 2013).

La información que se obtiene a través de esta técnica de procesamiento digital de imágenes RGB puede ser utilizada para diferentes aplicaciones. Algunas de las aplicaciones son la confección de mapas de riego y tratamiento a las malas hierbas, detección de plagas, detección de zonas favorables para los cultivos, determinación de cobertura vegetal y salud de los cultivos, entre otras.

El procesamiento digital de imágenes RGB con fines agrícolas ha sido utilizado en diversos países. En Cuba se han desarrollado proyectos a través del procesamiento digital de imágenes con diferentes fines. Actualmente con la nueva planificación económica que se lleva a cabo se aboga por el desarrollo de la agricultura. Cuba es un país donde históricamente el azúcar ha sido un producto de gran importancia para la economía nacional, desde los años 90 la producción de azúcar decayó notablemente, por esto actualmente se está luchando para recuperar la posición perdida. De aquí que se están introduciendo nuevas tecnologías en los campos para aumentar el rendimiento de los cultivos de caña de azúcar.

El Grupo de Automática Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central Marta Abreu de las Villas se propuso contribuir al desarrollo de la producción azucarera en nuestro país. Para tal fin se plantea la selección de un software de procesamiento digital de imágenes a través del que se extraerá información de interés para mejorar el crecimiento y el rendimiento en plantaciones de caña de azúcar.

El **problema científico** se enfoca entonces en: ¿Cómo contribuir al desarrollo de la agricultura del país mediante el desarrollo de un sistema de procesamiento de imágenes RGB?

Como **hipótesis** se plantea: Si se toman imágenes de plantaciones de caña de azúcar y se analizan en un software de procesamiento digital de imágenes para

determinar parámetros relacionados al crecimiento, entonces se hará posible dar un tratamiento enfocado al crecimiento del cultivo en las zonas de menor cobertura detectada y así contribuir al desarrollo de la agricultura.

Por tanto, **el objetivo general** propuesto para este trabajo es:

Realizar un estudio de los software disponibles para el procesamiento de imágenes RGB con vista a la obtención de información de interés agrícola en áreas tropicales, realizando evaluaciones experimentales con la tecnología disponible.

Teniendo como **objetivos específicos**:

- Determinar las condiciones bajo las que deben ser tomadas las imágenes.
- Determinar los principales parámetros de crecimiento que pueden ser caracterizados con dichas imágenes.
- Seleccionar un software de procesamiento capaz de extraer la información determinada en el objetivo anterior o al menos un subconjunto.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende aportar un sistema capaz de extraer información acerca del crecimiento y salud de plantaciones de caña de azúcar, a través del análisis de imágenes RGB de los cultivos. Con esta información se hará posible mejorar el crecimiento y la salud de los cultivos, con un implícito ahorro de recursos hídricos e insumos agrícolas.

Organización del informe

El informe está dividido en: introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, trabajo futuro y referencias bibliográficas. Los capítulos están organizados de la siguiente manera:

CAPÍTULO I: Se realiza un análisis de las aplicaciones de los vehículos aéreos para la toma de imágenes RGB para la agricultura de precisión. Además se analizan los principales software usados en el procesamiento de imágenes RGB y se exponen los resultados alcanzados en trabajos donde han sido empleados. Se hace una comparación entre los distintos software teniendo en

cuenta las potencialidades para el procesamiento digital de imágenes y las aplicaciones para las cuales se han utilizado. Seguidamente se seleccionan los software de mayores potencialidades para la confección de la aplicación a desarrollar.

CAPÍTULO II: Se exponen los materiales con los que se cuenta para la toma de las imágenes RGB a procesar. Además se realiza un análisis de los software seleccionados en el capítulo anterior y se selecciona uno de ellos para el desarrollo del método que se propone.

CAPÍTULO III: Se desarrolla el método de procesamiento de las imágenes aéreas a través del software seleccionado en el capítulo anterior y se analizan los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 1. EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES EN LAS APLICACIONES AGRÍCOLAS.

1.1 Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados UAV son una de las herramientas para la teledetección en la agricultura, los mismos se abordarán en este capítulo. Además, se realizará un análisis de los diferentes software que se emplean en la actualidad para el desarrollo de aplicaciones agrícolas a partir del procesamiento de imágenes de los cultivos. Se expone la gran gama de aplicaciones que estos pueden desarrollar con el análisis de imágenes RGB. Y se dan a conocer las herramientas básicas con las que cuentan cada uno de estos software en la Tabla No. 1. Se realiza una comparación de los software, teniendo en cuenta las aplicaciones de los mismos y las herramientas que presentan; para poder seleccionar los de mayores potencialidades y así obtener parámetros de interés agrícola.

1.2 Toma de imágenes por vehículos aéreos no tripulados UAV

Durante los últimos años, los vehículos aéreos no tripulados UAV, han sido muy utilizados en diferentes campos de acción, constituyéndose como una seria alternativa a la aviación tripulada en determinado tipo de misiones. Su aplicación en el campo militar y civil, viene demostrando grandes ventajas frente a las plataformas tripuladas en algunas áreas de acción como aquellas misiones donde es necesaria la permanencia en el aire por largos períodos de tiempo o la vida de los pilotos sufre riesgos debido a la existencia de ambientes hostiles (Sánchez G., 2013). Pueden ser adquiridos fácilmente en el mercado y son una solución económicamente viable, debido a la relación costo y prestaciones.

Los UAV se han desarrollado como una nueva plataforma tremendamente versátil para la adquisición de imágenes remotas con multitud de aplicaciones en cartografía, termografía y agricultura (Díaz J., 2015). A partir de los 80s con la puesta en órbita de satélites, se ha facilitado el monitoreo de la superficie terrestre con interés agrícola. Sin embargo, ante la demanda de información detallada, los satélites tienen la limitante de suministrar información espectral de baja resolución (Ojeda W., 2015). Esta limitación puede ser solventada con

el uso de los vehículos aéreos no tripulados, que pueden volar a muy baja altura (<100 m), por tanto, permiten la captura de imágenes de muy alta resolución espacial (1-5 cm/píxel). Además, pueden tomar imágenes en días nublados y pueden ser manejados autónomamente o por el usuario, lo que añade una total flexibilidad para tomar las imágenes en el momento óptimo de aplicación de medidas de control (Torres J., 2013). Otra de las ventajas de los UAV es el bajo costo de los sensores empleados, pudiéndose usar cámaras digitales convencionales.

El uso de los vehículos aéreos no tripulados en la agricultura es una práctica cada vez más común, los buenos resultados en términos de eficiencia son confirmados por agricultores e investigadores, debido a la maximización de rendimientos (Díaz J., 2015). A diferencia del agricultor que debe desplazarse por el campo buscando las deficiencias que puedan existir en el cultivo, el UAV vuela sobre el campo y logra recabar información con mayor precisión (Díaz J., 2015). Estos vehículos se hacen imprescindibles para muchas aplicaciones agrícolas tales como: La discriminación de malas hierbas en fase temprana con técnicas de teledetección (Peña J., 2014), en el monitoreo de malas hierbas, fertilización nitrogenada y estimación de la producción para incrementar la rentabilidad de los cultivos de maíz (Portero C., 2015), en la detección y el cartografiado de rodales de malas hierbas en fase temprana para la creación de mapas que permitan optimizar el uso de herbicida localizado (Borra I., 2015). Se emplean en el estudio de índices a través de los que se crean mapas georreferenciados para que equipos agrícolas puedan realizar tratamientos fitosanitarios o programas de riego. Con ellos es posible determinar el estado hídrico de las plantas y el estrés nutricional de las mismas, a través del conocimiento de estos parámetros se hace posible un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos y un uso más óptimo de los fertilizantes (Díaz J., 2015).

El Grupo de Automática Robótica y Percepción (GARP) cuenta con el modelo UAV USENSE-X8, el cual posee una reputación de fiabilidad y robustez en el mercado de aviones autónomos. Es un pequeño avión autónomo de ala fija. El sistema del piloto automático se basa en tecnología open-source (código abierto) y tiene un uso civil y científico. Su diseño específico permite un

funcionamiento flexible y se puede implementar de forma segura en diferentes entornos y condiciones meteorológicas. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la Fotogrametría, la Agricultura de Precisión, el estudio medioambiental, la búsqueda y salvamento, informes de noticias, entre otras aplicaciones.

1.3 Aplicaciones de los software de procesamiento digital de imágenes en Agricultura de Precisión.

Los software de procesamiento digital de imágenes cuentan con un cierto número de herramientas que le permiten procesar las imágenes adecuadamente. La cantidad de herramientas hacen más o menos potentes los software, por tanto, no todos son capaces de desarrollar las mismas tareas. A la hora de desarrollar una aplicación, como el procesamiento digital de imágenes aéreas para la agricultura de precisión, se debe seleccionar un software que cuente con las herramientas suficientes y necesarias para el desarrollo de dicha tarea.

Dentro de los parámetros básicos con los que cuenta un software de procesamiento digital de imágenes se encuentran las entradas, se llama así a la variedad de formatos de imágenes que dicho software es capaz de manejar. Otros de los parámetros fundamentales son las herramientas para el procesamiento, dentro de los que se puede encontrar el análisis de imágenes, perfeccionamiento de las imágenes, transformaciones a las imágenes, transformaciones geométricas y posibilidad para el desarrollo de código. Además existe otro factor influyente que siempre hay que tener en cuenta, el costo, este es el factor que determina la accesibilidad del producto.

Los software de procesamiento le permiten al usuario no solo visualizar elementos en tres dimensiones sino también realizar análisis cuantitativos a partir de dichos elementos (Fallas, 2007). Es por esto que han sido muy utilizados para la creación de aplicaciones que ayudan al desarrollo de la agricultura y al mejoramiento de la vida del hombre que cultiva la tierra.

Existen múltiples software que se utilizan para el procesamiento digital de imágenes, los cuales tienen características similares pero no todos se deben utilizar para los mismos fines debido a que no tienen la misma precisión ni las mismas especificaciones.

Algunos software de procesamiento digital de imágenes son ENVI, eCognition, MATLAB, ImageJ y las librerías AForge.Net y OpenCV.

1.3.1 El software ENVI

ENVI es un software de procesamiento y análisis avanzado de imágenes geoespaciales, y es utilizado por analistas de imágenes, investigadores, científicos y profesionales del SIG en una amplia variedad de disciplinas. ENVI combina procesamiento de las imágenes espectrales más recientes con la tecnología de análisis de imágenes mediante una interfaz intuitiva y fácil de usar para ayudar a obtener información significativa de las imágenes. ENVI proporciona instrumentos avanzados fáciles de usar para leer, explorar, preparar, analizar y compartir la información extraída de todo tipo de imágenes (diferentes sensores): imágenes pancromáticas, multiespectrales, hiperespectrales.

Este software se ha empleado para la realización de diferentes estudios en diversas partes del mundo, a continuación se dan a conocer algunos de estos estudios:

En la Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia, se realizó un estudio en cultivos de lechuga (*Lactuca sativa*), aquí se aplicó la segmentación de imágenes de cultivos mediante color para discriminar de forma precisa y eficiente los píxeles, o zonas de una imagen, que corresponden al suelo o a vegetación (Escarabajal D., 2014). De esta forma, el resultado de la clasificación en suelo o planta puede usarse para la medición del coeficiente de cobertura vegetal. Para esta aplicación se empleó el software de procesamiento de imágenes ENVI (*Environment for visualizing images*). Como resultados de este estudio se obtuvo que la clasificación por color resulta viable en la práctica al producir unos resultados del 99,5% de acierto en la clasificación, requiriendo únicamente 0,3 segundos por imagen en un ordenador estándar. Segundo, que los mejores modelos de color son aquellos que separan un canal de luminancia y dos de crominancia, donde los segundos son los que aportan la información relevante para el problema.

En la Universidad Autónoma de Sinaloa, México, se realizó un estudio mediante el análisis de imágenes para la cartografía temática de Uso y Cobertura de Suelo para los Municipios de Culiacán y Navolato, a partir de la

aplicación de técnicas de clasificación digital (Beltrán J., 2011). Para ello, se realizó el procesamiento de imágenes de la plataforma satelital Landsat 5 TM del año 2011, a través del Software de procesamiento ENVI 4.8. Para realizar la clasificación se definió una leyenda con 11 categorías (Acuicultura, Agricultura de Riego, Agricultura de Temporal, Agricultura de Invernadero, Área Sin Vegetación Aparente, Asentamiento Humano, Bosque, Cuerpos de Agua, Matorral, Selva y Vegetación Hidrófila). Las clases que se lograron clasificar con una mayor precisión fueron las selvas y la agricultura de riego y temporal. Mientras que las de menor precisión fueron la vegetación hidrófila, agricultura de invernadero y asentamiento humano.

1.3.2 Las librerías AForge.NET y OpenCV, su uso con el Visual Estudio

El software Microsoft Visual Estudio Express es un programa de desarrollo en entorno de desarrollo integrado (IDE) para sistemas operativos Windows desarrollado y distribuido por Microsoft Corporation. Soporta varios lenguajes de programación tales como Visual C++, Visual C#, Visual J#, ASP.NET y Visual Basic .NET. En este software se hace posible el trabajo con librerías tales como AForge.NET y OpenCV, las cuales brindan una serie de herramientas para el procesamiento de imágenes.

La librería AForge.NET Framework es un marco de trabajo de C# diseñado por desarrolladores e investigadores en el campo de la visión computacional y la inteligencia artificial en el procesamiento de imágenes, la visión computacional, las redes neuronales, algoritmos genéticos, las máquinas de aprendizaje, etc. Puede acceder a cámaras IP, a cámaras web por USB, soporte para Microsoft Kinect sensor y soporte para cámaras XIMEA.

Esta librería se ha empleado para diversos fines en diferentes países, se ha logrado desarrollar aplicaciones de gran importancia para la agricultura tales como las que se mencionan a continuación:

En la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, se realizó un estudio a imágenes de hojas de cultivos de Begonias Semperflorens (Flores de azúcar) una planta de carácter ornamental, con el fin de detectar daños causados por plagas (Cáceres C., 2014). Las imágenes fueron sometidas a un procesamiento 'off-line', en un software desarrollado en la plataforma Visual

Express C#2010, utilizando la librería AForge.NET de código abierto, debido a que dicha librería brinda facilidades en el tratamiento de imágenes y técnicas de inteligencia artificial. Como resultados se encuentra que el problema en el desarrollo del proyecto fue la determinación de los umbrales correctos para cada algoritmo utilizado, la solución consistió en optimizar los parámetros de los algoritmos por medio de una red neuronal. El uso de dicha red, después de su comprobación con el 60% de las fotografías tomadas, fue altamente limitado por el tiempo de procesamiento que requería el análisis de cada imagen lo cual es debido al alto número de capas utilizadas, por tanto se tomó únicamente como referente.

La librería de visión artificial y código abierto OpenCV proporciona un marco de trabajo de alto nivel para el desarrollo de aplicaciones de visión por computadora en tiempo real: estructuras de datos, procesamiento, análisis de imágenes y análisis estructural, etc.

Esta librería al igual que la librería AForge.NET es muy empleada para el desarrollo de aplicaciones, algunos ejemplos son:

En la Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia, se realizó un estudio mediante el procesamiento digital de imágenes para la medición precisa de las propiedades físicas de los frutos, tales como el peso y el nivel de maduración (Atencio P. , 2009). Para este procesamiento se empleó el software Visual C++ y las librerías de software Open CV y AForge.NET. Se desarrolló una aplicación capaz de realizar un procedimiento geométrico para la estimación del peso del fruto Mango de azúcar (*Mangifera Indica L.*), de manera automática mediante el análisis de imágenes. Esto constituye un procedimiento típico e importante en varios procesos industriales orientados a la clasificación y selección de productos de calidad para la exportación.

En la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador, se realizó un estudio para integrar técnicas de procesamiento digital de imágenes orientadas al reconocimiento y clasificación de frutas por su forma (Constante P., 2015). Para el procesamiento se empleó el software Visual C++ Express 2010 y la librería de software de procesamiento de imágenes OpenCV. Dentro de los resultados que se lograron el porcentaje de clasificación fue de un 87,5%, pues de 40 imágenes de frutas logró reconocer 35. Este sistema puede elegir a los

mejores ejemplares de frutas, logra un bajo costo, permite mejorar factores como higiene, inspección visual humana y mala manipulación.

En la Universidad Autónoma Chapingo, México, se realizó un estudio en plantaciones de rosas para la detección del hongo cenicilla a través del análisis de imágenes (Velázquez N., 2011). Para el procesamiento de las imágenes se empleó la librería de software Open CV (Fuente abierta de visión por computadora). Durante la detección de la enfermedad se encuentran que los principales problemas fueron: reflexión de luz (halo), fotografías fuera de foco y fotografías muy oscuras. Las plantas reflejan la luz solar causando que hojas sanas fueran erróneamente detectadas. Para desarrollar un sistema de control totalmente automático para el cultivo en invernaderos, nuevos estudios tienen que llevarse a cabo, tales como la detección de la enfermedad a través de video en tiempo real con una cámara en red. En un futuro se tiene que hacer la detección de la enfermedad en tiempo real utilizando archivos de video, así como llevar a cabo experimentos a diferentes distancias y con diferentes condiciones de luz.

En la Universidad de Mauricio, se realizó un estudio en plantaciones de caña de azúcar para reconocer enfermedades causadas por hongos, a través del análisis de imágenes de las hojas en las cuales se evidencian en forma de manchas (Sungkur R., 2013). En esta aplicación se empleó para el procesamiento de imágenes el software Visual C++ y la librería de software Open CV. Se logró crear un sistema de reconocimiento automático para enfermedades causadas por hongos en las hojas de caña de azúcar. Este sistema logró procesar cada fotografía en un tiempo menor que 60 segundos, logrando una precisión en el reconocimiento de alrededor del 95.3%.

En la Kasetsart University, Bangkok, Thailandia, se realizó un estudio en plantaciones de caña de azúcar de la Provincia de Nakhonsawan, con el fin de estimar la cantidad de nitrógeno presente en este cultivo (Auearunyawat P., 2012). Para este fin se analizan imágenes RGB y se relacionan con imágenes NIR, para el procesamiento de las imágenes se empleó la librería de software Open CV 2.1. Como resultado de este estudio se demostró la relación entre el color de las hojas de la caña y la concentración de nitrógeno presente en ellas.

1.3.3 El software eCognition

eCognition 9.1 es una plataforma de análisis de imágenes comprendida para el análisis de imágenes multidimensionales. Contiene varias herramientas para extraer inteligencia de cualquier imagen digital de forma completamente automática o semiautomática.

eCognition esencialmente es un software que ofrece soluciones out-of-the-box para realizar comúnmente tareas de sensado remoto de bosques, zonas agrícolas y el mapeo de la superficie terrestre. Además, los usuarios pueden ejecutar tareas para detectar cambios comparando cualquier par de imágenes de dos intervalos de tiempo diferente o usando una capa existente del GIS y comparando esta con una imagen adquirida recientemente. Permite realizar análisis por la vía de la segmentación de imágenes y el muestreo basado en la detección y clasificación de cambios, combinado con un juego de herramientas interactivas para un control de calidad. Algunas de las aplicaciones en las que se ha empleado este software son:

En el Instituto de Agricultura Sostenible de Córdoba, España, se realizó un estudio para la discriminación de malas hierbas en fase temprana con técnicas de teledetección en una parcela donde había un cultivo de girasoles (Peña J., 2014). Se empleó el software de procesamiento de imágenes eCognition developer 8.9 (Trimble GeoSpatial, Munich, Alemania), con el cual se desarrolló el algoritmo de clasificación OBIA utilizado para el análisis de las imágenes, las imágenes se dividieron en 30 marcos para la clasificación. Como resultados de este estudio el algoritmo OBIA detectó las líneas de cultivo de girasol con un 100% de exactitud en todos los casos analizados. Los porcentajes de precisión en la detección de malas hierbas obtenidos para cada altura fueron diferentes. A baja altura (40 m) se obtuvo un 71% de marcos clasificados correctamente. Según aumentó la altura de vuelo se observó que la detección empeora, pasando en 60m a un porcentaje de acierto de 43% y bajando a un 29% y un 19% respectivamente para 80 y 100 m. Respecto a la precisión en la detección de los marcos en los que no existía mala hierba, el método aplicado alcanzó un 100% de exactitud en la clasificación de las imágenes tomadas a 40 y 60 m de altura.

1.3.4 El software MATLAB

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Sus capacidades pueden ser ampliadas mediante las cajas de herramientas (toolboxes), para el procesamiento de imágenes se emplea el toolbox "Image Processing". Este toolbox soporta en su entrada imágenes y videos, generados por diferentes instrumentos como: cámaras web, cámaras digitales, satélites, sensores aéreotransportados, dispositivos para imágenes médicas, microscopios, telescopios, y otros instrumentos científicos.

Este software es uno de los software que más se emplea en la actualidad para el desarrollo de aplicaciones donde se extraen diferentes parámetros de imágenes. En el Centro Nacional de Investigaciones de Café, Chinchiná, Caldas, Colombia, se realizó un estudio para medir a través del procesamiento de imágenes la severidad de la mancha de hierro que afecta las hojas del cafeto (Guzmán P., 2003). Para desarrollar esta aplicación se empleó el software MATLAB, versión 5.3 que incluye técnicas de procesamiento de imágenes y reconocimiento por color. Con esta aplicación se logró conocer con mayor precisión y rapidez el área foliar de las plantas de café y el área afectada por esta enfermedad o la producida por algún otro disturbio fitosanitario, permitiendo obtener resultados más confiables que pueden ser reproducibles en otras investigaciones.

En Amrita School of Engineering, Bangalore, India, se realiza un estudio para identificar malas hierbas de imágenes tomadas de diferentes campos y cultivos con el objetivo de reconocer las diferentes malas hierbas presentes en estos (Mrs. Latha, 2014). Para el desarrollo de esta aplicación se empleó el software MATLAB. Se logró desarrollar un método capaz de identificar malas hierbas a través del procesamiento de imágenes, lo cual conlleva a un uso más reducido de los herbicidas.

En Bannari Amman Institute of Technology, India, se realizó un estudio para el control de plagas mediante el procesamiento de imágenes en cultivos de café (Krishnan M., 2013). Para esta aplicación se empleó el software MATLAB en el

procesamiento de las imágenes. Se logró desarrollar un prototipo de sistema fiable para la rápida detección de plagas y con ello se logra disminuir el uso de los productos químicos que contrarrestan los ataques de las plagas. Además el algoritmo alcanzado puede ser modificado para encontrar enfermedades en los cultivos y puede ser empleado en otros software más sofisticados.

En la India a través de Rajgad Dyanpeeth Technical Campus y Pandharpur College of Engineering se realizó un estudio de imágenes RGB en plantaciones de caña de azúcar para determinar la severidad de los daños ocasionados en las hojas por enfermedades causadas por hongos (Patil S., 2011). Para el procesamiento de las imágenes se empleó el software MATLAB 7.4. Dentro de los resultados de este estudio se encontraron que las características de las enfermedades tienen variaciones significantes en los diferentes estados de la enfermedad, por lo que el método para segmentar las regiones afectadas tuvo promedio de exactitud del 98.60%. Esta aplicación ayuda a los agricultores a decidir la cantidad de pesticida a aplicar, conllevando a un ahorro de recursos económicos y a menor contaminación de Medio Ambiente.

1.3.5 El software ImageJ

ImageJ es un programa de código abierto en Java para el procesamiento de imágenes el cual está inspirado en NIH Image.

En la Facultad de Ciencias Agrarias, Medellín, Colombia, se realizó un estudio para medir el área foliar de las plantas (Rincón N., 2012). Para esta aplicación se empleó el software de procesamiento digital de imágenes ImageJ. Los resultados obtenidos en comparación al medidor de área foliar tienen una desviación máxima del 2%. Estos resultados sugieren una gama amplia de posibilidades para este sistema como herramienta para la investigación agrícola y biológica, debido a la disponibilidad de estos equipos que son de bajo costo, fáciles de usar y portátiles. Esta es una aplicación de gran importancia pues reduce visiblemente los costos, ya que un medidor de área foliar es un equipo sumamente costoso, sin embargo puede ser sustituido por el simple procesamiento de imágenes, el cual tiene un costo ínfimo.

1.3.6 Comparación de los software

Dentro de las aplicaciones de interés agrícola que mayor interés despierta en nuestra investigación se encuentra la determinación de la cobertura vegetal en plantaciones de caña. La determinación de la cantidad de vegetal existente en una porción de suelo brinda información muy valiosa, pues a partir aquí se puede estimar el rendimiento de la producción. Otras de las importancias del conocimiento de la cobertura vegetal es que permite realizar un manejo más eficiente de los insumos agrícolas, lo cual significa un mejoramiento en la economía. Cuando se localizan las zonas de menor crecimiento se puede realizar un estudio más detallado de estas zonas y llegar a tomar decisiones para mejorar el crecimiento, ya sea suministrando abono, agua o resembrando en las zonas más críticas.

Para el desarrollo de esta aplicación es necesario seleccionar un software que brinde un grupo de herramientas, pues todos los software no pueden realizar las mismas tareas debido a que no presentan las mismas herramientas. Para la determinación de la cobertura vegetal un software debe contar con herramientas que permitan segmentar imágenes. Además debe contar con otras herramientas para el perfeccionamiento de las imágenes, entre ellas los diferentes filtros (como el filtro de media). Los software que se presentan como candidatos para el desarrollo de esta aplicación son: ENVI, MATLAB, ImageJ, eCognition y las librerías de software AForge.NET y OpenCV empleadas en el software Visual Studio Express.

Estos software han sido empleados en varios países y en aplicaciones de interés como lo son la detección de plagas, enfermedades, malas hierbas, cobertura vegetal y medición de las propiedades de frutos. Estos software presentan un grupo de herramientas que facilitan la detección de características intrínsecas en las imágenes de los cultivos. Este grupo de herramientas fue expuesto en la Tabla 1, al unísono de otros software como ENVI, eCognition e ImageJ.

Tabla No. 1 Comparación de software

Software	ENVI	AForge.NET	OpenCV	eCognition	MATLAB	ImageJ
Formatos de imágenes	Cualquier formato de imagen.	JPEG, MJPEG, AVI, FITS, PNM	BMP, JPEG, TIFF, Pxm, Sun Raster	JPEG-2000 (*.JP2), MrSID(*.SID), LASzip(*.LAZ)	AVI, JPEG, JPEG-2000, FITS, HDF, HDF-EOS, M4V, MOV, MP4, PNG, TIFF, ASCII, Binary files	TIFF (no comprimido) o datos raw, GIF, JPEG, BMP, PNG, PGM, FITS y ASCII.
Análisis de imágenes	Segmentación, estadígrafo, detección de cambios, mediciones, clasificación.	Detección de bordes, detección de esquinas, generadores de ruido, filtros de textura, Operadores morfológicos, estadígrafo, filtros de color.	Recuperación de contornos, detección de características, detección de bordes, estadígrafo, morfología, transformación de distancias, segmentación, reconocimiento de objetos, textura.	Segmentación, clasificación, detección de objetos, modificación de objetos.	Segmentación, morfología, estadísticas, mediciones, reconocimiento de objetos, textura.	Medición de área, estadígrafos, generadores de histogramas.
Perfeccionamiento de imágenes	Filtros de convolución, filtros morfológicos, filtros de textura, filtros adaptativos, filtros de frecuencia.	Filtrado matemático y morfológico, manipulación de los canales de color, reducción de color, filtros de textura, filtrado de píxeles por color.	Filtros para arreglos, ajustes de histogramas, normalización de brillo,		Filtrado con operadores morfológicos, <i>deblur and sharpen</i> , filtrado lineal, mediano o adaptativo, ecualización de histogramas, remapeo de los rangos dinámicos, ajuste de la gama de valores, ajuste de contrastes.	Suavizado, afilado, filtrado medio, ajuste interactivo de brillo y contraste.
Transformaciones de imágenes	Afilado de imágenes, transformaciones de color, aplicación de estiramiento de saturación, aplicación de estiramiento fotográfico.	Transformación Hough, contraste, brillo, color	Transformación Hough, dilatación, transformaciones de distancias, perfeccionamiento de la imagen.	Fusión, afilado, ortogonalización, simplificación.	Incluye el perfeccionamiento de imágenes, restauración y compresión, transformaciones Hough, Radon, DCT y fan-beam proyección.	
Transformaciones geométricas	Rotación de imágenes, reajuste de imágenes.	Transformaciones de cuadriláteros, reescalado y rotación	Ajustes elípticos, ajustes lineales, defectos de convexidad.		Rotar imágenes, reducción de la resolución, corrección de distorsiones geométricas, transformaciones geométricas 2D.	Segar, escalar, redimensionar y rotar.
Interfaz para el desarrollo	Tiene un compilador para IDL.	Se desarrolla en el lenguaje C#, mediante	Se desarrolla en el lenguaje C/C++,		Presenta un lenguaje propio	Tiene soporte para la

de líneas de código		una interfaz de líneas de código.	mediante una interfaz de líneas de código.		(Lenguaje M) y posibilidades para desarrollo en código C.	creación de líneas de código.
Costo	Consta de una licencia que prohíbe su venta a Israel y a Cuba.	Software libre.	Software libre.	Tiene licencia	Tiene licencia, pero para fines académicos es libre.	Software libre.

El software ENVI presenta varias herramientas de interés, pero tiene una licencia que rige su comercialización y uso, esta licencia prohíbe su uso y comercialización en Cuba, por lo cual se hace imposible su uso en nuestro país. El software eCognition está destinado específicamente al procesamiento de imágenes aéreas para el desarrollo de aplicaciones de mapeo y geo-referenciación, por lo que no cuenta con suficientes herramientas para cumplir adecuadamente los objetivos planteados. El software ImageJ, es un software que se especializa en aplicaciones para la microscopía y la mayoría de sus herramientas son para el desarrollo de mediciones de distancias, ángulos entre otras, dejando de ser un software potente para el procesamiento digital de imágenes.

Por otra parte, las librerías AForge.NET, OpenCV y el software MATLAB sí cuentan con numerosas herramientas para el procesamiento digital de imágenes. Además, permiten el desarrollo de líneas de código en lenguajes eficientes como lo son C/C++, C#, e incluso el MATLAB presenta un lenguaje propio, el lenguaje M que es fácil de emplear. El desarrollo a través de líneas de código brinda flexibilidad para el desarrollo de las aplicaciones. Las librerías AForge.NET y OpenCV pueden ser adquiridas fácilmente pues sus licencias se encuentran bajo los términos de software libre, además hay plataformas para trabajar con estas librerías que también son libres, tal es el caso de Visual Estudio Express. MATLAB presenta licencia de software propietario, pero las licencias con fines académicos son de muy bajo costo o libres, por lo que se ha hecho muy popular en las investigaciones académicas.

Después de realizar un detallado análisis de los 6 software se llega a la conclusión que los software que cumplen la mayor cantidad de aspectos son: AForge.NET, OpenCV y MATLAB. Sobre todo porque cuentan con

herramientas como la segmentación para el análisis de imágenes, de gran importancia para esta investigación.

1.4 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se ha demostrado el desarrollo alcanzado a nivel mundial por los UAV, sobre todo los buenos resultados en términos de eficiencia de los vehículos aéreos no tripulados en la agricultura. Además, se presentaron los diferentes software que se emplean en la actualidad para el desarrollo de aplicaciones agrícolas a partir del análisis de imágenes de los cultivos, donde se mostró la gran gama de aplicaciones que estos pueden desarrollar con el análisis de imágenes RGB.

Presentado el marco teórico y luego de un análisis de la bibliografía consultada, se arriban a las siguientes conclusiones parciales:

- Los vehículos aéreos no tripulados UAV se hacen imprescindibles para muchas aplicaciones agrícolas, donde se requiere de gran calidad de las imágenes a analizar.
- Estos vehículos pueden ser adquiridos fácilmente en el mercado y son económicamente viables, debido a su bajo costo y a las prestaciones que brindan.
- Los software para el procesamiento digital de imágenes han sido utilizados en muchas partes del mundo para la creación de aplicaciones que ayudan al desarrollo de la agricultura.
- Estos software tienen características similares pero no todos se deben utilizar para los mismos fines debido a que no tienen la misma precisión ni las mismas especificaciones.
- Los software de procesamiento le permiten al usuario no solo visualizar elementos sino también realizar análisis cuantitativos. De ahí que se seleccionaron el software MATLAB y las librerías AForge.NET y OpenCV empleadas por el software Visual Studio Express como los candidatos principales para procesar las imágenes con las que se cuenta.

En el próximo capítulo se realizará un análisis detallado de los software seleccionados, MATLAB y las librerías AForge.NET y OpenCV, se profundizará

en el funcionamiento de estos y se determinará cuál de ellos es el más indicado para cumplir los objetivos planteados.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

El análisis profundo de los software seleccionados en el capítulo anterior, MATLAB y las librerías AForge.NET y OpenCV es el objetivo fundamental de este capítulo. Después de analizados los software se determinará cual es el que se empleará para el procesamiento de las imágenes en la determinación de cobertura vegetal en cultivos de caña de azúcar. También se describirán los materiales con los que se cuenta para la obtención de las imágenes aéreas RGB de los cultivos.

2.2 Materiales para la captura de las imágenes aéreas

Para la captura de imágenes aéreas se emplea un vehículo aéreo no tripulado UAV USENSE-X8. Sobre este vehículo se monta una cámara con un sensor RGB Canon S100.

2.2.1 Componentes del UAV USENSE-X8

Estructura Aérea (Figura 2–1):

- Peso: 3kg (incluyendo cámara y batería).
- Dimensiones: 215 x 90 x 25cm (Ancho x Largo x Altura).
- Velocidad de cruce: 12 m/s.
- Máxima velocidad: 35 m/s.
- Duración del vuelo: 30-45 min (dependiendo de la altura y del viento).
- Altura de vuelo: 100-200m (sobre el nivel de la tierra).



Figura 2-1: Estructura aérea.

Sistema de Radio Control (Figura 2–2):

- Rango Manual: 1000m.
- Frecuencia: 2.4 GHZ.



Figura 2-2: Sistema de Radio Control.

Piloto Automático (Ardupilot) (Figura 2–3):

- Tipo: Ardupilot APM2.5.
- Sensores incluidos: GPS, IMU, Magnetómetro, Sensor de Velocidad Aérea, Sensor de
- Voltaje, Barómetro.
- Frecuencia registrada: 10Hz.
- Rango del Autopiloto: Ilimitado.



Figura 2-3: Ardupilot.

Telemetría (Figura 2–4):

- Rango telemétrico: 1500m (puede extenderse a 10km).
- Frecuencia: 433 o 915 MHz.
- Razón de los datos aéreos: 250kbps.



Figura 2-4: Telemetría.

2.2.2 Cámara Canon S100 (Figura 2–5):

- Megapíxeles: 12MP.
- Franja: 200m.
- Opciones: disparador automático o por intervalos.



Figura 2-5: Cámara.

Se cuenta con una PC portátil (laptop) debido a que es necesario para cargar la misión en la aeronave y para supervisar el recorrido del avión.

2.3 Características de los software

Los software de procesamiento de imágenes que se seleccionaron en el capítulo anterior ofrecen una serie de características que facilitan al usuario el desarrollo de las diferentes aplicaciones para el procesamiento de imágenes. MATLAB es un software, pero las librerías OpenCV y AForge.NET requieren de un software para emplearse, para este caso el software seleccionado es Visual Studio Express. Este software ofrece el entorno para que se puedan desplegar las potencialidades de estas librerías, las librerías son las que portan las herramientas para el procesamiento de las imágenes. Las siguientes características serán tomadas en cuenta para mostrar las potencialidades de MATLAB y las librerías en el procesamiento de imágenes:

- Lenguaje y funcionamiento
- Requerimientos de hardware y software
- Interfaz gráfica
- Soporte técnico

2.3.1 Librería OpenCV

Lenguaje y funcionamiento

La librería OpenCV es una API de aproximadamente 300 funciones escritas en lenguaje C que se caracterizan por lo siguiente:

- Su uso es libre tanto para su uso comercial como no comercial
- No utiliza librerías numéricas externas, aunque puede hacer uso de alguna de ellas, si están disponibles, en tiempo de ejecución.
- Es compatible con The Intel® Processing Library (IPL) y utiliza The Intel® Integrated Performance Primitives (IPP) para mejorar su rendimiento, si están disponibles en el sistema.
- Dispone de interfaces para algunos otros lenguajes y entornos: EiC - intérprete ANSI C escrito por Ed Breen. Hawk y CvEnv son entornos interactivos (escritos en MFC y TCL, respectivamente) que utilizan el intérprete EiC; Ch - intérprete ANSI C/C++ creado y soportado por la compañía SoftIntegration; Matlab® - gran entorno para el cálculo numérico y simbólico creado por Mathworks.

Requerimientos de hardware y software

Este software corre sobre las computadoras personales que se basan en la arquitectura de los procesadores Intel y corre en Microsoft Windows 95, 98, 2000, o Windows NT.

Interfaz gráfica

La librería OpenCV proporciona varios paquetes de alto nivel para el desarrollo de aplicaciones de visión. Todos ellos se pueden agrupar en librerías de C/C++ dirigidas a usuarios avanzados y en herramientas de scripting dirigidas, en este caso, a usuarios de nivel medio (ideal para practicar con las distintas técnicas

de procesamiento de imágenes y visión). Al primer grupo pertenecen HighGUI y CvCam, mientras que al segundo pertenecen Hawk y OpenCV Toolbox para Matlab®.

De los paquetes anteriores, HighGUI permite la escritura/lectura de imágenes en numerosos formatos (BMP, JPEG, TIFF, Pxm, Sun Raster, etc.) y la captura de stream de video de capturadoras Matrox® y cámaras/capturadoras con drivers VFW/WDM (la mayoría del mercado); la creación de ventanas para visualizar imágenes en ellas, las ventanas HighGUI recuerdan su contenido (no es necesario implementar callbacks de repintado); y además, nos proporciona mecanismos muy fáciles de interaccionar con ellas: trackbars, capturando la entrada del teclado y el ratón.

Soporte técnico

Los manuales de usuarios están disponibles en la red. Además existe una amplia comunidad de desarrolladores que brindan innumerables ayudas y soluciones a problemas muy comunes con el trabajo en esta librería.

Algunas convenciones

El software de OpenCV tiene las siguientes convenciones:

- Los identificadores constantes están en mayúsculas; por ejemplo, CV_SEQ_KIND_GRAPH.
- Todos los nombres de las funciones usadas para el procesado de imagen tienen el prefijo del cv, por ejemplo: "cvCreateImage", "cvSobel", "cvAdd". . .
- Todas las funciones externas de OpenCV empiezan con el prefijo cv, y todas las estructuras con prefijo Cv.

Cada nueva parte de una función empieza con un carácter en mayúscula, por ejemplo: cvContourTree.

Los nombres de funciones en OpenCV tienen el siguiente formato: cv [action] [target] [mod] () donde:

-> action: la acción indica la funcionalidad del centro, por ejemplo, -Set-, -Create-, -Convert-.

-> target: indica el área donde el procesamiento de la imagen está siendo establecido, por ejemplo : -Find Contours, -ApproxPoly.

En la mayoría de los casos, target consiste en dos o más palabras, por ejemplo: MatchContourTree.

Algunos nombres de funciones consisten en una acción u objetivo solamente, por ejemplo: las funciones, cvUndistort o cvAcc respectivamente.

-> mod: es un campo opcional; indica una modificación de la funcionalidad de la función. Por ejemplo: en la función cvFindExtrinsicCameraParams_64d, _64d, indica que es una función constante particular de 64d valores.

OpenCv, además posee infinidad de funciones como para calcular la media de una región, funciones de dibujo (líneas, polilíneas, círculos, elipses, etc.), funciones de detección de objetos, de calibración de cámaras, para vídeo, y muchas más (Arévalo, 2002).

2.3.2 Software MATLAB

Lenguaje y funcionamiento

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se encuentran la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete de software de MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones: Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes) que cubren actualmente la mayoría de áreas principales del mundo de la ingeniería y la simulación, como por ejemplo

la toolbox de procesamiento digital de imágenes (IPT de aquí en adelante), la toolbox de procesamiento de señal, la toolbox de comunicaciones... y así hasta más de 150 herramientas.

MATLAB proporciona un entorno de trabajo interactivo cuyo elemento básico de trabajo son las matrices, lo que permite la resolución numérica de problemas en un tiempo mucho menor que si se utilizaran lenguajes de programación tradicionales como pueden ser los lenguajes Fortran, Basic o C, con la ventaja de que su lenguaje propio de programación es similar al de los lenguajes tradicionales. Al trabajar con matrices se pueden describir infinidad de variables de una forma altamente flexible y matemáticamente eficiente. Por ejemplo, una imagen se puede escribir como una matriz de píxeles, un sonido como una matriz de fluctuaciones, y en general se puede describir con una matriz cualquier relación lineal entre las componentes de un modelo matemático.

MATLAB empezó a utilizarse por investigadores y profesionales de Ingeniería de Control, expandiéndose rápidamente a diferentes disciplinas. Actualmente es un programa muy utilizado en educación, particularmente en la enseñanza del álgebra lineal y el análisis numérico, y es muy popular entre los científicos trabajando en procesamiento digital de imágenes. Los usuarios de MATLAB proceden de varios campos de la ingeniería, ciencia y economía, y pese a ser un paquete de software profesional y de precio elevado, ha conseguido instaurarse rápidamente en las aulas y despachos de muchos centros educativos de todo el mundo con una política efectiva de licencias de evaluación de bajo coste.

MATLAB cuenta con muchas funciones, con las cuales se pueden realizar diferentes trabajos de interés en las imágenes. Sus comandos son fáciles de ejecutar debido a la simplicidad del lenguaje (Fiter, 2012).

Requerimiento de hardware y software

Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Mac OS X.

Interfaz grafica

Ventanas: Son de diversos tipos. Las ventanas que forman el núcleo (kernel) del programa se organizan en el escritorio (desktop), pero en una sesión típica se abren y cierran gran número de ventanas secundarias correspondientes a figuras, editores de ficheros o de variables. Existen además ventanas específicas correspondientes a la ayuda y a las demostraciones (helps y demos). En el procesamiento digital de imágenes aparecerán sobre todo ventanas con las imágenes que van siendo tratadas a lo largo de los programas.

Soporte técnico

Existen manuales en español creados por la comunidad educativa, además del manual oficial del software.

2.3.3 Librería AForge.NET

Lenguaje y funcionamiento

AForge.NET es un framework de código abierto en C#, diseñado por investigadores y desarrolladores en el campo de la visión por computador y la inteligencia artificial para el procesamiento de imágenes, redes neuronales, algoritmos genéticos, lógica difusa, máquinas de aprendizaje, robótica, etc. El desarrollo del framework está en constante avance.

Requerimiento de hardware y software

Es posible el desarrollo de aplicaciones .NET no solo para Windows sino para Mac y Linux, aunque no todas las librerías están disponibles para Linux. Esta librería puede ser utilizada a través del software Visual Estudio.

Interfaz grafica

Introduce conceptos como depuración del visualizador: los visualizadores son componentes de la depuración de la interfaz de usuario de Visual Estudio. Un visualizador crea una caja de dialogo u otra interfaz para mostrar una variable o un objeto de una forma apropiada para este tipo de datos. Por ejemplo, un visualizador HTML interpreta una cadena de HTML y muestra los resultados como estos deben aparecer en la ventana del escritorio; un visualizador de

mapas de bits interpreta una estructura de mapa de bits y muestra el gráfico que este representa.

AForge.NET framework introduce pocos componentes de visualización para algunas clases, las cuales son muy utilizadas cuando se depura el procesamiento de imágenes y algoritmos de visión por computador. En este punto existen visualizadores para la siguiente lista de clases:

- *System.Drawing.Image;*
- *System.Drawing.Imaging.BitmapData;*
- *AForge.Imaging.UnmanagedImage;*
- *AForge.Math.Histogram.*

Soporte técnico

El framework no solo está provisto de diferentes librerías sino que también con muchos ejemplos de aplicaciones, las cuales demuestran su usabilidad, además consta con ayudas en formato HTML. Toda la documentación está disponible on-line.

2.3.4 Selección del software adecuado para el procesamiento

De los tres, el software MATLAB es el único que requiere de una licencia para su uso. Por su parte, OpenCV y AForge.NET son librerías de código abierto que necesitan de un ambiente de desarrollo determinado para realizar las aplicaciones. Para el trabajo con ellas se seleccionó el software Visual Studio Express (ver Figura 2-6), es de carácter gratuito y es proporcionado por la compañía Microsoft Corporation debido a que su distribución es libre aporta ventajas. Soporta varios lenguajes de programación tales como Visual C++, Visual C#, Visual J#, ASP.NET y Visual Basic .NET, aunque actualmente se han desarrollado las extensiones necesarias para muchos otros. De las dos librerías OpenCv es muy potente, está desarrollada por Intel, proporciona un entorno de desarrollo fácil de utilizar y altamente eficiente, debido a su programación en código C y C++ optimizados, aprovechando además las capacidades que proveen los procesadores multi núcleo. OpenCV puede además utilizar el sistema de primitivas de rendimiento integradas de Intel, un conjunto de rutinas de bajo nivel específicas para procesadores Intel. La

comunidad que desarrolla aplicaciones a través del empleo de esta librería es muy amplia por lo que es muy fácil encontrar ayuda. A partir del análisis anterior, consideramos que el software Visual Studio Express con el empleo de la librería OpenCv es el más adecuado de los tres para procesar las imágenes aéreas de caña de azúcar y determinar en ellas los parámetros de interés para el crecimiento.

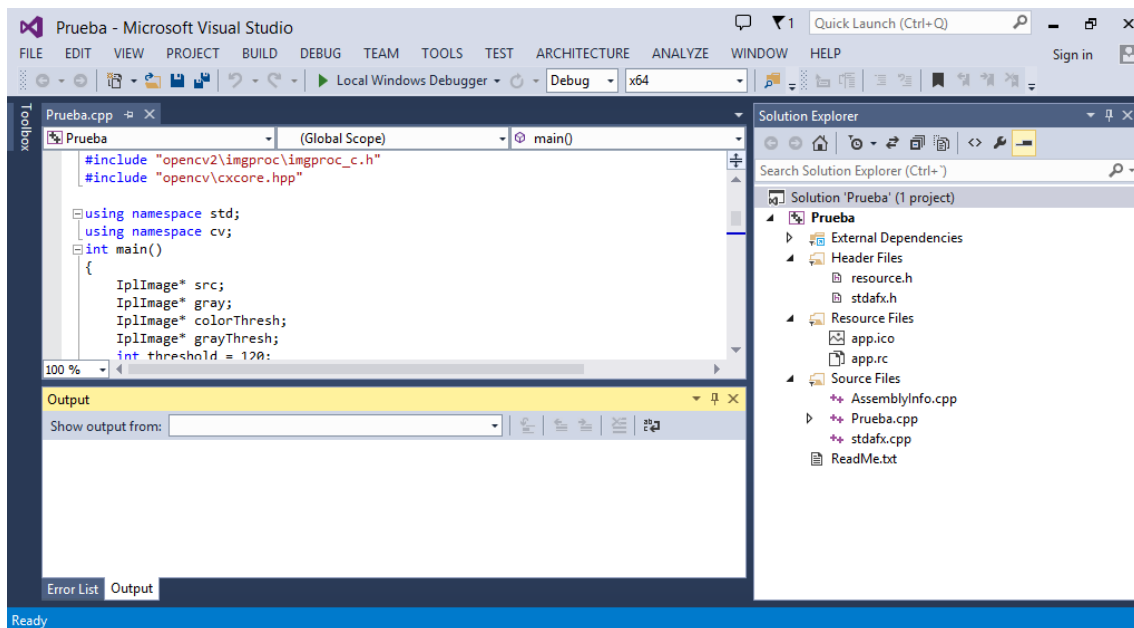


Figura 2-6: Interfaz gráfica del software Visual Studio Express.

2.4 Elaboración del plan de vuelo

Antes de realizar una misión, con un UAV, es imprescindible diseñar un plan de vuelo. A raíz de un estudio previo que se le hacen a todos los elementos que forman parte de la misión, se presenta el modo a llevar a cabo el vuelo y se elabora un procedimiento en el que se detalla la forma y conjunto de medios necesarios para el mismo. Para la elaboración de este plan es preciso seguir una serie de pasos de gran importancia para que sea efectiva la misión, los cuales se presentan en este epígrafe.

2.4.1 Chequeo previo al vuelo

Previo al vuelo se necesita tener información general sobre el terreno y sobre otros factores referentes al mismo, además de que todo tiene que estar en orden para evitar que en la misión no se obtengan los resultados esperados. Los elementos a tener en cuenta para esta misión son:

- Campo: Primeramente se debe analizar el terreno que el cliente seleccionó para realizar el vuelo.
 - Realizar el trabajo de oficina con el Mission Planner donde se realizan las siguientes tareas: Actualizar la caché de fotos de la zona de vuelo en el software: se procede conectando el software a internet y este obtiene la información del territorio en Google Earth.
 - Trazar la ruta de la misión.
- Fecha: Fecha en la que se realizará la misión.
- Zona de despegue y aterrizaje: Se selecciona la zona de despegue y aterrizaje en el polígono de la misión.
- Tiempo de comienzo- Tiempo de parada.
- Altitud local: Esta se puede conocer por el GPS del autopiloto.
- Piloto/Co-Piloto: El Piloto es el encargado del despegue y el aterrizaje de la aeronave y el Co-piloto debe estar frente a la computadora observando el recorrido del vuelo desde el software Mission Planner. Deben tener buena comunicación entre ellos y estar a una corta distancia uno del otro. De esta forma no se compromete la misión pues cualquier problema que pueda tener la aeronave el Co-piloto se lo comunica al Piloto para que detenga la misión.
- Condiciones de iluminación: Vienen dadas según las condiciones ambientales, es decir si está nublado, soleado, completamente oscuro o lluvioso. Para la realización de una misión apropiada lo ideal es un día soleado.
- Velocidad del viento y dirección: La velocidad del viento se debe tomar con un Anemómetro. La dirección del mismo se verifica que sea del noroeste pues Cuba presenta la características de tener vientos alisios en esta dirección por lo tanto las rutas de la misión se planifican en ese sentido, nunca transversal pues puede afectar la misión causando inestabilidad en el vuelo.
- Elevación del vuelo: A que altura debe volar el UAV. La altura debe ser pequeña pues así las fotos tienen buena calidad y se evitan la

interferencia de elementos que puedan perjudicar las imágenes tomadas.

Comprobar las condiciones del avión y sus componentes:

- Comprobar el voltaje de la batería.
- Comprobar si el motor y la hélice están apropiadamente sujetas.
- Conectar las alas y asegurarse de que están conectadas correctamente.
- Comprobar la batería de la cámara y la memoria: la batería debe tener más del 50 por ciento de la carga y la memoria debe estar vacía y cerrada.
- Comprobar el modo de la cámara (TV) y la velocidad del obturador de la cámara debe estar acorde a las condiciones de luz (soleado: 1200, nublado: 1000, muy oscuro: 800).
- Comprobar si el filtro UV no está dañado y está limpio.
- Comprobar el estado de la batería del radio receptor.
- Comprobar el estado de la batería de la PC portátil.
- Instalar y conectar la batería al autopiloto.
- Conectar el módulo telemetría a la estación a tierra, poner en marcha el Mission Planner y establecer el enlace con el UAV.
- Cuando el autopiloto inicialice, comprobar el estado de la IMU, GPS y telemetría.
- Cargar la misión en la aeronave.

Despegue del UAV:

Para que un UAV despegue puede ser impulsado de varias formas: con catapulta, con una liga llamada Bunjee o con la mano. La que se utilizará es con la mano la cual es más flexible y no alcanza altas elevaciones.

2.4.2 Software a utilizar para realizar el plan de vuelo

El Mission Planner es el software que se utilizará como estación a tierra, el cual es la interfaz para el hardware y este realiza la preparación inicial, configuración, prueba y análisis después de la misión (Torres-Sánchez and López-Granados, 2013).

Este software posee las siguientes características:

- Carga el firmware (el software) en el piloto automático que controla al vehículo. Establece, configura y pone en punta al vehículo para un rendimiento óptimo. Planifica, guarda y carga misiones autónomas.
- Descarga y analiza los registros de la misión creados por el piloto automático.
- Con el hardware de telemetría adecuado:
 - Supervisa el estado del vehículo mientras está en funcionamiento.
 - Realiza registros de telemetría récord (Torres-Sánchez and López-Granados, 2013) que contienen mucha más información que los registros de los pilotos automáticos a bordo.
 - Observa y analiza los registros de telemetría.
 - Opera el vehículo en FPV (vista en primera persona).

Crear la misión:

Para crear la misión se siguen los siguientes pasos:

1. Al entrar al Mission Planner aparece la vista de la Tierra y se acerca la imagen hasta llegar al territorio donde se va a realizar la misión.
2. Dar click derecho y seleccionar Auto WP y luego Survey (GridvZ) como se muestra en la (Figura 2-7).

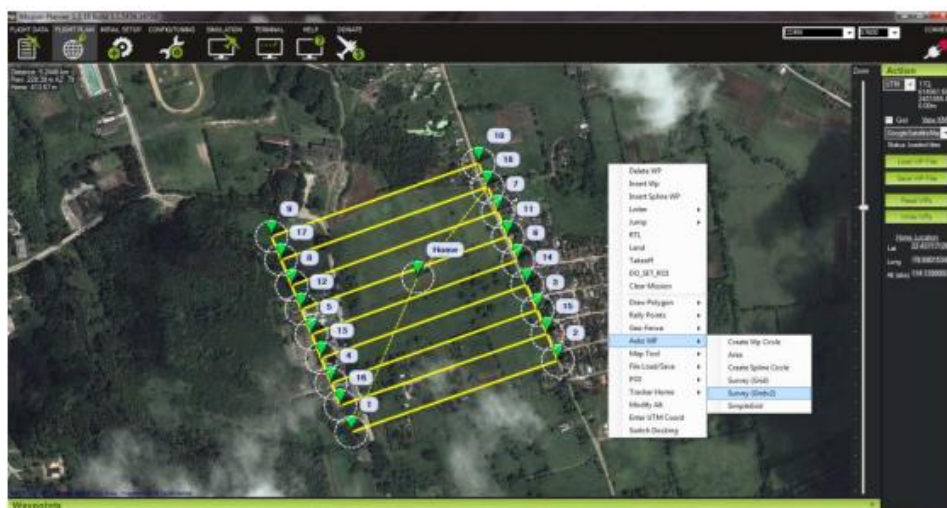


Figura 2-7: Pantalla Principal del Mission Planner

3. Al salir la nueva ventana pulsar el botón Box y marcar, en el terreno seleccionado para el vuelo, un cuadro que bordeee el área donde realizará el recorrido el avión. En Aircraft se selecciona el UAV que se va a utilizar

(USENSE- X8) y en Camera se encuentran una serie de cámaras que se proponen a utilizar (Canon s100) como se muestra en la (Figura 2–8).

Al marcar el recorrido en el cual se va a desarrollar la misión, el software muestra una serie de datos aproximados referentes a la distancia del vuelo, distancia entre líneas, distancia entre imágenes, tiempo de vuelo, número de pasos, entre otros datos.



Figura 2-8: Ventana de navegación del Mission Planner

2.5 Método para el procesamiento

El método a desarrollar se basa en la extracción de información que ofrece el espectro visible RGB. El manejo de color presenta grandes ventajas por su baja dimensionalidad, alta expresividad y facilidad de procesamiento. El color puede servir para discriminar de forma precisa y eficiente los píxeles, o zonas de una imagen, que corresponden al suelo o a vegetación. De esta forma, el resultado de la clasificación en suelo o planta puede usarse para la medición del coeficiente de cobertura vegetal (Fernández G., 2014).

A través del color se puede saber cuándo una planta de caña de azúcar es saludable o no, muchas deficiencias de nutrientes son reflejadas en las hojas de la planta a través de los cambios de coloración. Las deficiencias de nitrógeno en la planta se manifiestan por la presencia de una coloración verde amarilla. Las manchas de color púrpura denotan deficiencia de fósforo, la falta de potasio se refleja en un marcado amarillamiento de las hojas. La falta de calcio produce manchas cloróticas pequeñas con la parte interior necrosada

que se torna de color rojizo oscuro (R., 1995). A través del análisis del color es posible definir el promedio de vegetación existente en una imagen de cultivo de caña de azúcar, así como también se hace posible determinar que parte de este cultivo se presenta en un estado saludable y cual no.

El trabajo con la librería OpenCv y el software Visual Studio Express permite extraer la información de las imágenes del cultivo de caña de azúcar mediante una serie de acciones programadas. Una vez que las imágenes son cargadas por el software pasan por una serie de procesos para su análisis:

- Primero se realiza un proceso de segmentación.
- Luego de segmentada la imagen se obtienen sus dimensiones y el espacio que ocupa el cultivo en ella, calculando el promedio de vegetación presente.
- Posteriormente se determina un rango para el color verde puro, esto permite determinar la parte donde el cultivo presenta una salud óptima.

La segmentación es un proceso de agrupación de los píxeles de una imagen en regiones determinadas, normalmente conectadas. Las técnicas de segmentación se pueden dividir en tres grandes grupos: métodos basados en intensidad (p. ej. la umbralización), métodos basados en regiones (p. ej. crecimiento de regiones, división de regiones y fundido de regiones) y otros métodos (segmentación basada en textura, bordes y movimiento). En este trabajo se emplea la umbralización. Esta es una técnica para el procesamiento de imágenes en la que una imagen de entrada en escala de grises se recuantifica a dos niveles de gris, o lo que es lo mismo, se convierte a imagen binaria. Cada pixel de la imagen original se compara con un umbral y el resultado de esa comparación determina si el pixel se convertirá a un nivel o a otro (blanco o negro, objeto o fondo). Para hacer la conversión de RGB a escalas de grises OpenCV brinda la función `cvtColor` donde el código que se emplea es `CV_BGR2GRAY`, cabe destacar que existen otros tipos de conversiones. La función que ofrece OpenCv para la binarización es `cvThreshold`. Esta función toma la imagen en escalas de grises y es capaz de convertirla en una imagen binaria, mediante la aplicación de un umbral. Todos los valores superiores al valor umbral serán binarizados a 1 los que no superen ese valor lo serán a 0.

Para la obtención de las dimensiones de una imagen se emplea el nombre de la imagen y el símbolo (->) seguido de la dimensión, width para el ancho y height para el alto. Luego se almacena en un contador la cantidad de píxeles negros de la imagen binarizada, estos son restados del total de la imagen y el resultado es la cantidad de verde presente en la imagen, que coincide con el cultivo de caña de azúcar.

Para determinar la porción de caña que presenta una buena coloración, lo cual denota que está saludable, se carga la imagen como una matriz y se transforma al espacio HSV. Para esta transformación es necesario utilizar la función cvtColor con el código COLOR_BGR2HSV. Luego de este paso se emplea la función inRange, la cual es empleada para la detección de objetos, dando a la salida una imagen binaria donde el objeto que desea detectar aparece en blanco y todo lo demás en negro. Para lograr la detección de un objeto deseado se le debe dar como parámetros a esta función el rango de color en que se encuentra dicho objeto. Para este caso se necesita detectar la caña que se encuentra con un buen estado de salud, este se ve reflejado en la coloración de sus hojas, las cuales presentan una coloración verde sin rastros de otra tonalidad. Por lo tanto el rango de color para detectar la caña sana debe ser la gama de los verdes, donde quedará eliminada cualquier otro tipo de coloración presente. Una vez obtenida la imagen en forma binaria, los píxeles verdes sanos aparecen de blanco y lo demás en negro y es calculado el promedio de los píxeles sanos.

2.6 Consideraciones finales del capítulo

- El software MATLAB y las librerías AForge.NET y OpenCV, que en nuestra consideración son los más adecuados para realizar un correcto procesamiento de las imágenes que tenemos. No obstante, presentan diferencias notables en cuanto a sus características para el procesamiento de imágenes, además de algunas limitaciones.
- La librería OpenCv resalta ser la herramienta más idónea para el desarrollo del procesamiento de las imágenes. Logra cumplir con grupo de expectativas que la colocan por encima del software MATLAB y la librería AForge.NET como herramientas para el procesamiento de

imágenes. Consta con un gran número de funciones, alrededor de 300, es libre, fue desarrollada por Intel, tiene un lenguaje C-C++ optimizado, es capaz de aprovechar características de los procesadores Intel multi núcleos.

- Antes de llevar a cabo cualquier misión con un UAV es imprescindible la elaboración de planes de vuelo. Partiendo de estudios previos realizados a los elementos de la misión.

CAPÍTULO 3. SISTEMA PARA DETERMINAR LA COBERTURA Y SALUD VEGETAL EN PLANTACIONES DE CAÑA DE AZÚCAR. RESULTADOS OBTENIDOS.

3.1 Introducción

Conocer cuando existe una buena cobertura vegetal y además cuando un cultivo es saludable o no brinda grandes ventajas a la hora de tomar medidas para mejorar el crecimiento y el rendimiento con un buen manejo de los insumos agrícolas. Para lograr obtener esta información se propone un sistema de procesamiento de imágenes RGB.

3.2 Procedimiento para la toma de las imágenes aéreas

El flujo de actividades que componen el procedimiento desarrollado para la toma y procesamiento de imágenes aéreas es el siguiente:

Luego de la solicitud del cliente se procede a estudiar el área de vuelo para tener conocimiento de las características del terreno a sobrevolar. Si las características del terreno no son favorables para realizar la misión, es decir si el terreno es montañoso o está en una zona de fuertes vientos (lugares cerca del mar), se le comunica al cliente y se termina la misión. Si el terreno cumple con los requisitos, se traza el plan de vuelo en el software Mission Planner. Luego se comprueba el estado del UAV y si alguno de sus componentes no está en buen estado, se valora la reparación en el terreno, si no es posible se termina la misión. Si es posible la reparación se corrigen los problemas técnicos y se vuelve a comprobar el UAV. Si todo está correcto se realiza el vuelo y luego de la finalización del mismo se efectúa el procesamiento de las imágenes tomadas.

En la (Figura 3-1) se muestra el sistema de flujo de trabajo desarrollado para la toma y procesamiento de imágenes RGB aéreas.

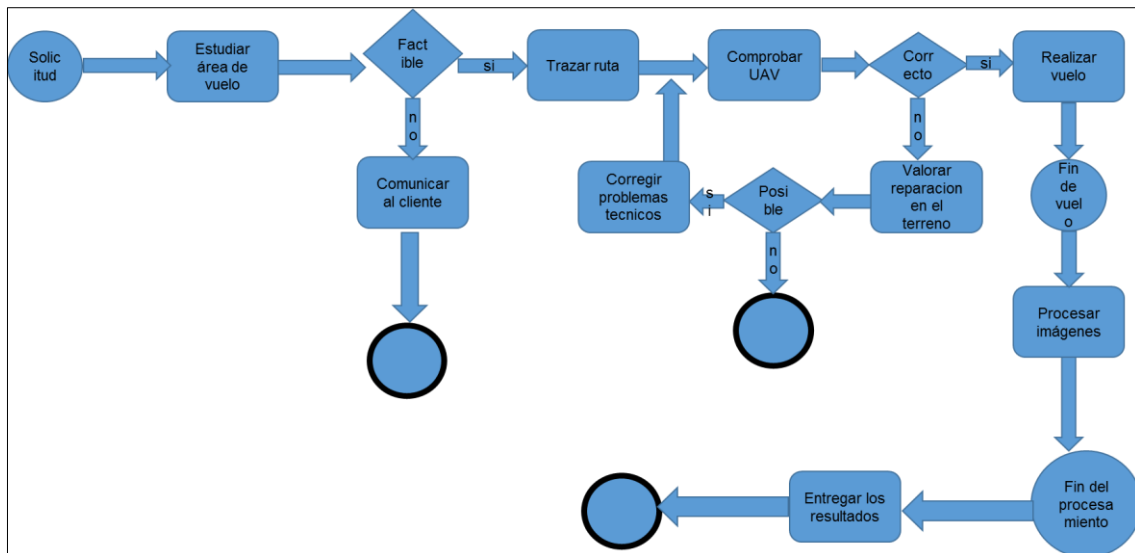


Figura 3.1: Sistema de flujo de trabajo desarrollado para la toma y procesamiento de imágenes RGB aéreas.

3.3 Aplicación del método

Para la segmentación de las imágenes se desarrollan una serie de pasos:

La imagen RGB (Figura 3 -2) es cargada desde el fichero donde se encuentra:

```
src = cvLoadImage("C:/IMG_1079.jpg", 1);
```

La imagen original es transformada a escala de grises (Figura 3-3), para lograr esto se ejecuta el siguiente código:

```
gray = cvCreateImage(cvSize(src->width, src->height), IPL_DEPTH_8U, 1);
cvCvtColor(src, gray, CV_BGR2GRAY);
```

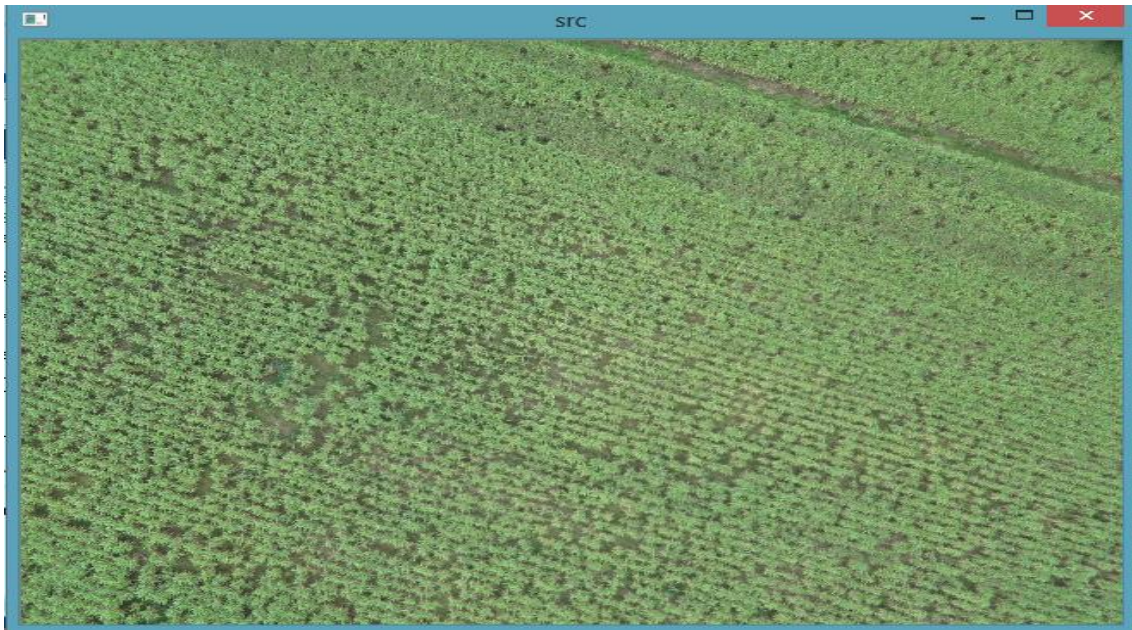



Figura3-2: IMG_1079. JPG.

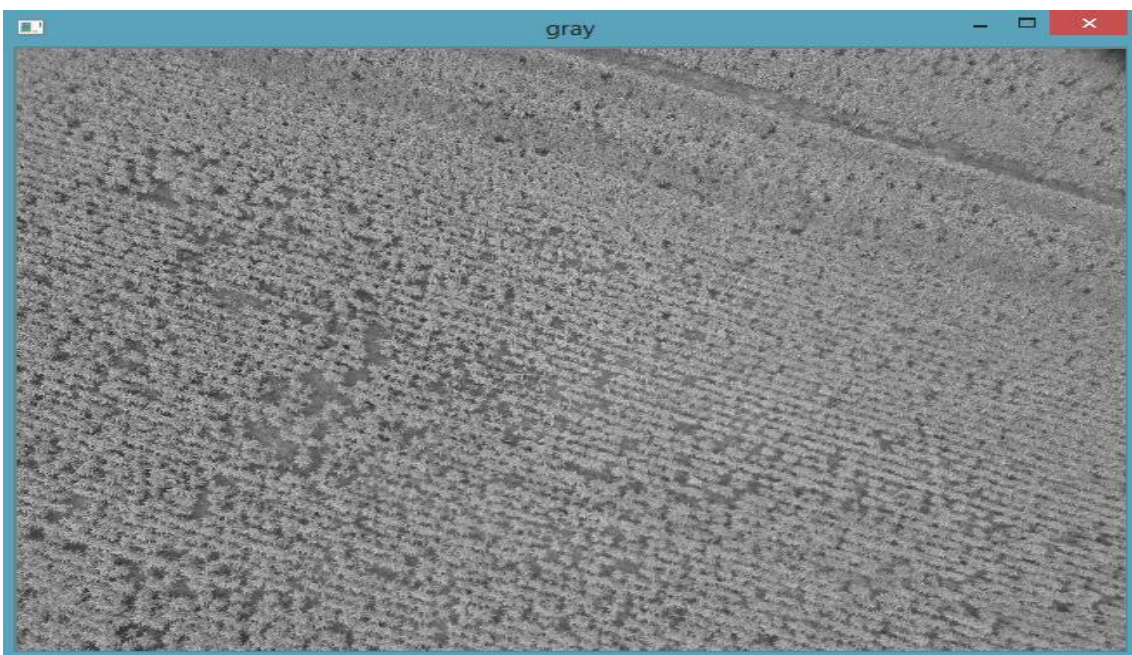


Figura 3-3: Imagen en escala de grises.

Luego la imagen en escalas de grises es binarizada (Figura3-4) mediante el empleo de la función:

```
cvThreshold(gray, grayThresh, threshold, maxValue, thresholdType);
```

Esta función es capaz de tomar una imagen en escalas de grises y transformarla en una imagen binaria en dependencia de umbral definido y el tipo de binarización. En este caso el umbral es 120, los valores por encima del umbral son interpretados como valores altos o 1 y en el caso de los valores por debajo de este umbral se denotan con 0, valores bajos, y el tipo de binarización es CV_THRESH_BINARY.

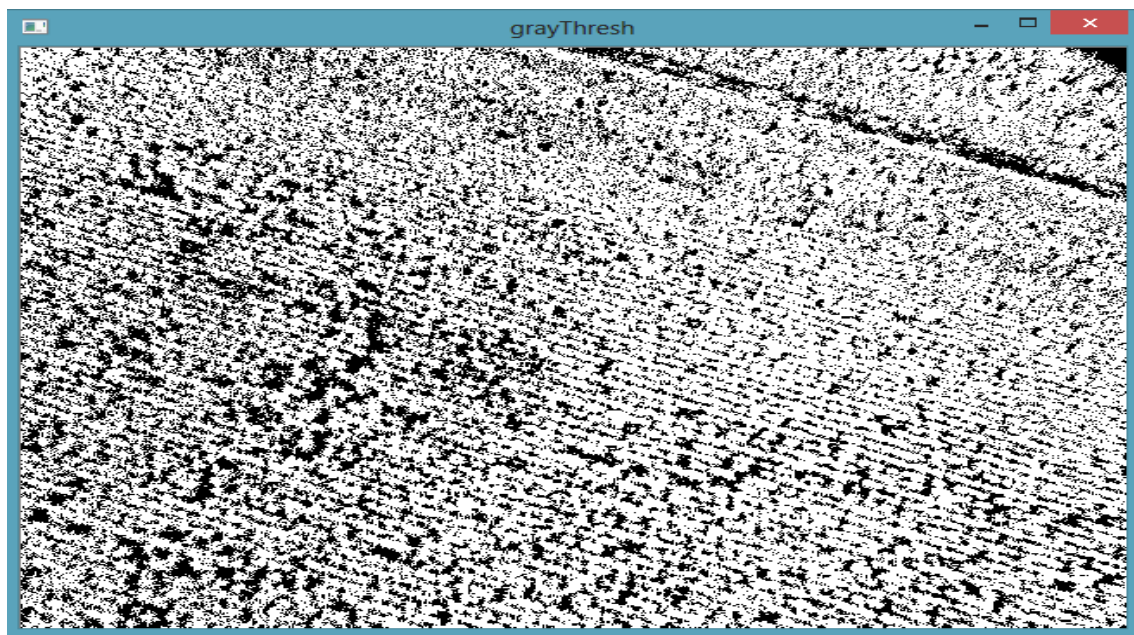


Figura3-4: Imagen segmentada después

Luego se toma la imagen original y basados en las transformaciones realizadas se determina que es caña y que es suelo, para esto se emplea el siguiente código:

```
float count = 0;
for (int i = 1; i < grayThresh->height; i++)
{
    for (int j = 1; j < grayThresh->width; j++)
    {
        CvScalar s;
        s = cvGet2D(grayThresh, i, j);
        if (s.val[0] == 0 && s.val[1] == 0 && s.val[2] == 0)
        {
```



```

        CvScalar d;
        d.val[0] = 0;
        d.val[1] = 0;
        d.val[2] = 0;
        cvSet2D(src, i, j, d);
        count = count + 1;
    }
}

}

```

Luego de aplicar este código la imagen queda finalmente de la siguiente forma (Figura 3-5):

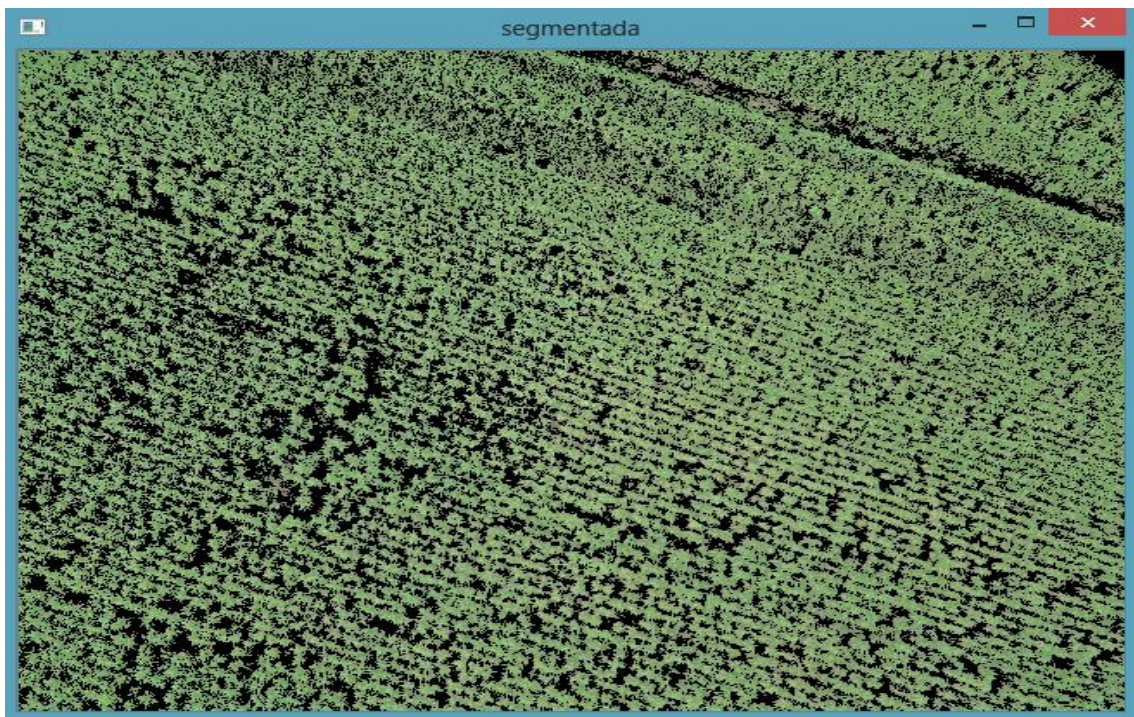


Figura 3-5: Imagen segmentada.

Para calcular el promedio de caña respecto al suelo se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{promedio} = ((\text{ancho} * \text{alto}) - \text{count}) / (\text{ancho} * \text{alto})$$

La variable count almacena la cantidad de píxeles que no son verdes. Y la variable promedio almacena el promedio de píxeles verdes en la imagen, este valor se muestra en la consola.

En la (Figura 3-6) se muestra todo el código desarrollado en OpenCV.

```
int main()
{
    IplImage* src;
    IplImage* gray;
    IplImage* colorThresh;
    IplImage* grayThresh;
    int threshold = 120;
    int maxValue = 255;
    int thresholdType = CV_THRESH_BINARY;
    src = cvLoadImage("C:/IMG_1079.jpg", 1);
    colorThresh = cvCloneImage(src);
    gray = cvCreateImage(cvSize(src->width, src->height), IPL_DEPTH_8U, 1);
    cvCvtColor(src, gray, CV_BGR2GRAY);
    grayThresh = cvCloneImage(gray);

    cvNamedWindow("src", CV_WINDOW_NORMAL);
    cvResizeWindow("src", 640, 480);
    cvShowImage("src", src);

    cvNamedWindow("gray", CV_WINDOW_NORMAL);
    cvResizeWindow("gray", 640, 480);
    cvShowImage("gray", gray);

    cvThreshold(gray, grayThresh, threshold, maxValue, thresholdType);

    cvNamedWindow("grayThresh", CV_WINDOW_NORMAL);
    cvResizeWindow("grayThresh", 640, 480);
    cvShowImage("grayThresh", grayThresh);

    float count = 0;
    for (int i = 1; i < grayThresh->height; i++)
    {
        for (int j = 1; j < grayThresh->width; j++)
        {
            CvScalar s;
            s = cvGet2D(grayThresh, i, j);
            if (s.val[0] == 0 && s.val[1] == 0 && s.val[2] == 0)
            {
                CvScalar d;
                d.val[0] = 0;
                d.val[1] = 0;
                d.val[2] = 0;
                cvSet2D(src, i, j, d);
                count = count + 1;
            }
        }
    }

    cvNamedWindow("segmentada", CV_WINDOW_NORMAL);
    cvResizeWindow("segmentada", 640, 480);
    cvShowImage("segmentada", src);

    float ancho = src->width;
    float alto = src->height;
    float negro = count;
    float area = (ancho*alto);
    float resta = area - count;
    float promedio = resta / area;

    printf("El promedio es %f\n", promedio);

    return 0;
}
```

Figura 3-6: Código usando OpenCV.

3.4 Resultados obtenidos

De un total de 288 imágenes georreferenciadas tomadas por el USENSE X8, desde una altura de 130 metros, se tomaron 40 para el procesamiento final debido a la presencia de varias irregularidades en las imágenes que afectaban su procesamiento. Por ejemplo, en la (Figura 3-7) se muestra una imagen con viviendas y vegetación que no corresponde a cultivo de caña.



Figura 3-7: Imagen de un poblado sin presencia de caña de azúcar.

En la (Figura 3-8) se muestra otro ejemplo de imagen donde no hay presencia del cultivo de caña. En esta imagen los valores de promedio de píxeles verdes son cercanos a cero y se decidió no tomarlos en cuenta.

Además, en la (Figura 3-9) se muestra otra imagen donde el área de caña es muy pequeña. En esta imagen hay presencia de malas hierbas, hay varios píxeles de color blanco (esto es una limitante para el método de umbralización), entre otras irregularidades.

En las imágenes anteriores no es posible determinar correctamente la cobertura vegetal del cultivo de caña de azúcar, por lo que las imágenes similares a esas no fueron procesadas. Es así que el método desarrollado se puso a prueba ante un grupo de 40 imágenes que presentaban en su mayoría cultivo de caña.



Figura 3-7: Imagen sin caña de azúcar.



Figura 3-9: Imagen con poca presencia de caña de azúcar y varias irregularidades que dificultan su procesamiento.

En la (Figura 3-10) se muestran la imagen original (IMG_0839) y segmentada que resultó con menor promedio (0.5316) de píxeles verdes del grupo de las 40 imágenes analizadas.

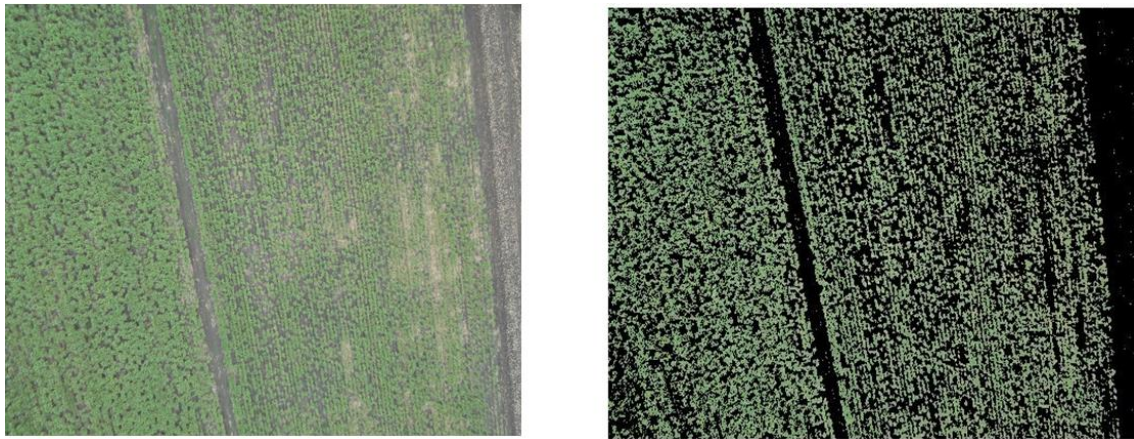


Figura 3-10: (Izquierda) Imagen de menor promedio de cobertura vegetal.
(Derecha) Imagen segmentada.

Además, en la (Figura 3-11) la imagen original (IMG_1075) y segmentada que resultó con el mayor promedio (0.7507) de píxeles verdes.

Al procesar las imágenes anteriores se pueden observar los lugares del campo donde existen problemas con el crecimiento del cultivo de la caña. En general, los resultados del método propuesto son satisfactorios, pues el cálculo del promedio de píxeles verdes se corresponde precisamente con la cantidad de caña de azúcar presente en las imágenes. De esta manera se muestra que se puede determinar con buena exactitud la cobertura vegetal del cultivo en las 40 imágenes analizadas.

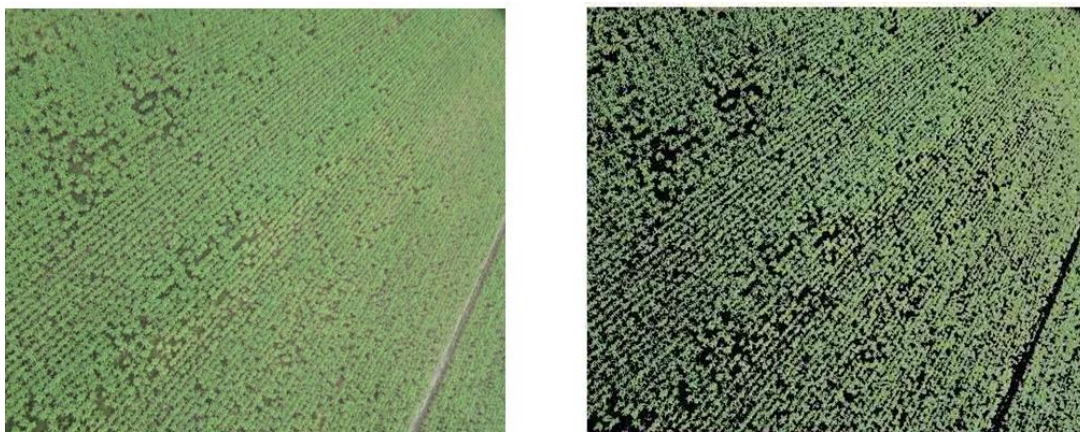


Figura 3-11: (Izquierda) Imagen de mayor promedio de cobertura vegetal.
(Derecha) Imagen segmentada.

En la (Figura 3-12) se muestran los resultados de los promedios de píxeles verdes en las 40 imágenes.

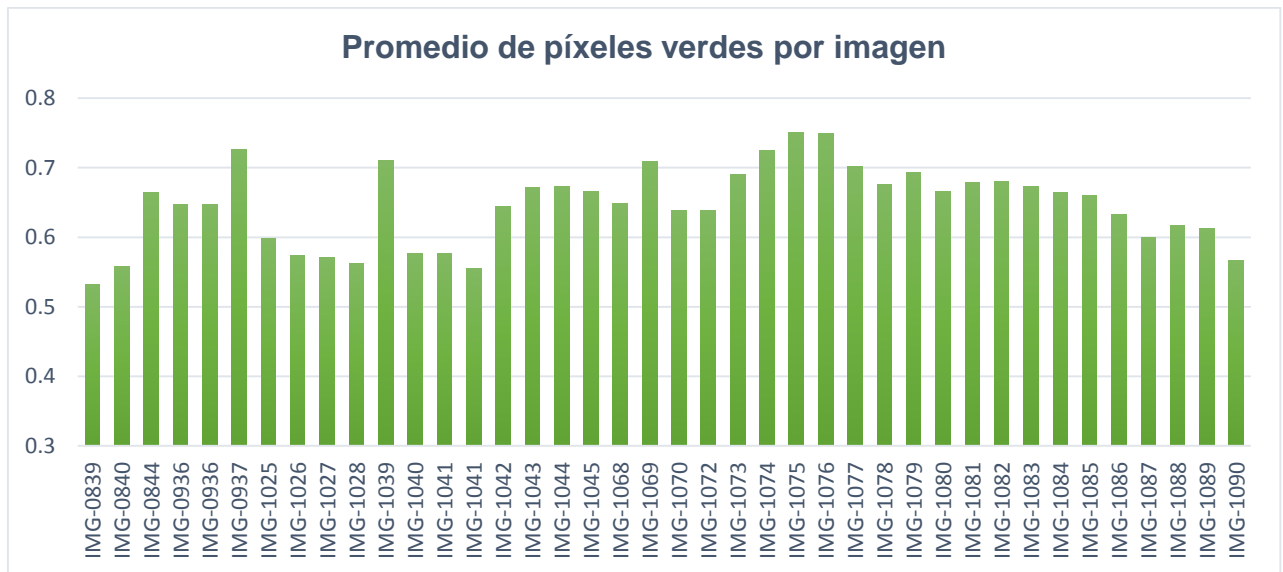


Figura 3-12: Promedio de cobertura vegetal por imagen.

A partir del análisis de la (Figura 3-12) se pueden seleccionar las imágenes con poco promedio de píxeles verdes. Estas imágenes se corresponden con regiones de baja cobertura vegetal, por lo que en esas regiones deben priorizarse las acciones para incrementar el crecimiento del cultivo de caña de azúcar.

3.5 Determinar zonas con buen estado de salud

Posteriormente la imagen se somete a otro proceso que determina que parte de la caña se encuentran en buen estado. Para esto se analiza la coloración del cultivo mediante el siguiente código:

```
Mat3b bgr = imread("C:/IMG_1079.jpg",1);
```

```
Mat3b hsv;
```

```
cvtColor (bgr, hsv, COLOR_BGR2HSV);
```

Este código lee la imagen RGB y la transforma al espacio de color HSV para posteriormente aplicar la función `inRange()`. Esta función permite extraer el rango de color deseado y lo muestra en una imagen binaria (Figura 3-13), donde queda representado por el color blanco. Para este caso se extrajo el color verde, desechando cualquier otro tipo de coloración que denote alguna deficiencia en la salud del cultivo.

```
inRange(hsv, Scalar(49, 50, 50), Scalar(80, 255, 255), mask1);
```

Luego se calcula la que fracción de la imagen corresponde a la caña sana para lograr esto se desarrolla el siguiente código:

```

float count = 0;
for (int i = 0; i < mask1.rows; i++)
    for (int j = 0; j < mask1.cols; j++)
    {
        uchar value = mask1[i][j];
        if (value == v)
            count++;
    }
float prom = count / (mask1.cols*mask1.rows);

```

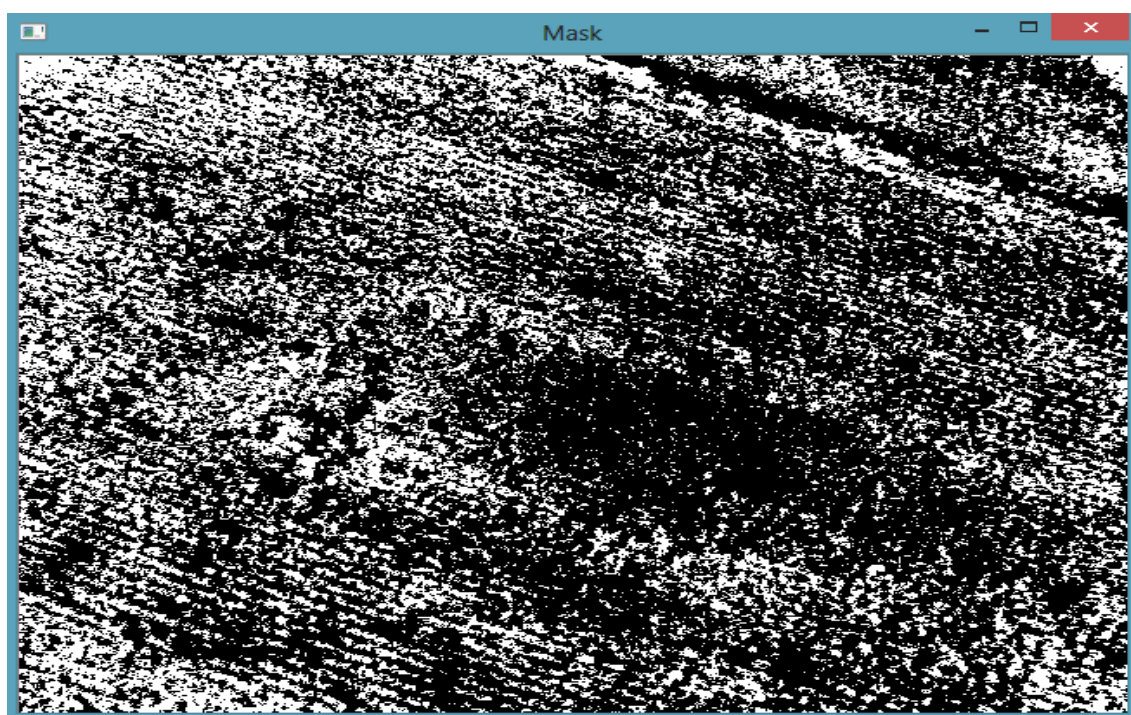


Figura 3-13: Caña en buen estado en la imagen IMG_1079 (prom=0.3298).

3.6 Análisis económico

En la Tabla 3.1 se presenta la relación de precios de los elementos que se utilizan en este proyecto para la realización de los vuelos y para el procesamiento de las imágenes.

Tabla 3.1

Elementos	Precios
UAV y sus componentes	400 USD
Cámara	469 USD
PC portátil para el trabajo en el terreno	350 USD
TOTAL	1219 USD

Se tiene un costo total de 1219 USD. En nuestra propuesta, el software utilizado es libre de costo, lo que permite contar con una alternativa nacional que puede ser perfeccionada y aplicada en sistemas de similares características sin depender de costos de importación y servicios de post-venta.

3.7 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se logró confeccionar un método capaz de determinar la cobertura vegetal y las zonas saludables en plantaciones de caña de azúcar mediante el procesamiento digital de imágenes RGB aéreas del cultivo. Este método se basó en la información que brinda el color, la vegetación se caracteriza por un color verde, el cual es capaz de diferenciarla de otros elementos del entorno, como el suelo. De aquí que fue posible segmentar las imágenes, separando la caña del suelo, resaltando en las imágenes el cultivo, y también fue posible determinar las regiones saludables.

A través de las imágenes de cultivos de caña que fueron tomadas desde el USENSE X8 a una altura de 130 metros con una cámara Canon S100 de 12 MP se logró determinar el promedio de la cobertura vegetal respecto al suelo. Esto brinda información valiosa para tomar decisiones a la hora de suministrar insumos agrícolas y mejorar el crecimiento de los cultivos. Fue posible determinar las zonas donde la caña se presentaba más saludable. De esta forma se hace posible también reconocer las regiones no saludables y determinar las necesidades del cultivo para su mejoramiento y desarrollo.

CONCLUSIONES

La determinación de cobertura vegetal y la salud del cultivo en plantaciones de caña de azúcar mediante el procesamiento de imágenes RGB aéreas es un tema de importancia para nuestro país. Para ello, los vehículos aéreos no tripulados UAV se hacen imprescindibles, ya que se requiere de gran calidad de las imágenes a analizar. Estos vehículos pueden ser adquiridos fácilmente en el mercado y son económicamente viables, debido a su bajo costo y a las prestaciones que brindan.

Para analizar correctamente las imágenes se hace necesario seleccionar un software de procesamiento digital de imágenes con las herramientas adecuadas según el problema que se quiere resolver. En esta tesis el principal objetivo es determinar parámetros de interés agrícola relacionados con el crecimiento en caña de azúcar; de ahí que la mayor contribución sea el desarrollo de un sistema de procesamiento capaz de determinar la cobertura vegetal y salud en plantaciones de caña de azúcar.

Al realizar esta investigación y analizar los resultados experimentales se llegó a las siguientes conclusiones:

- El software Visual Studio usando la librería OpenCV se seleccionó entre varios software para desarrollar el método propuesto debido a que la librería OpenCv es muy potente. Está desarrollada por Intel, proporciona un entorno de desarrollo fácil de utilizar y altamente eficiente, debido a su programación en código C y C++ optimizados, aprovechando además las capacidades que proveen los procesadores multi núcleo. OpenCV puede además utilizar el sistema de primitivas de rendimiento integradas de Intel, un conjunto de rutinas de bajo nivel específicas para procesadores Intel. Posee más de 300 funciones, su distribución es libre, es muy fácil encontrar ayuda para su utilización, pues la comunidad de desarrolladores es muy amplia.
- Las imágenes a procesar deben mostrar en su totalidad cultivo de caña y suelo, para garantizar una mayor exactitud en el cálculo del promedio

de la cobertura. Es por eso que se seleccionaron 40 imágenes para su procesamiento de un total de 288 imágenes.

- El método confeccionado tuvo un buen desempeño en el procesamiento de las imágenes tomadas, observándose su adecuado funcionamiento en la segmentación por color y el cálculo del promedio de la cobertura vegetal en plantaciones de caña de azúcar, así como en la determinación de zonas saludables.
- La información que brinda este método puede ser útil para la toma de decisiones a la hora de suministrar insumos agrícolas y mejorar el crecimiento de los cultivos.

RECOMENDACIONES

- Cambiar la cámara por otra que logre un mejor enfoque y que capture imágenes con mayor resolución, de esta forma sería más fácil reconocer los rasgos del cultivo y se podría lograr identificar elementos que afecte su salud.

TRABAJO FUTURO

- Determinar cobertura vegetal en otros cultivos con el método propuesto, para contribuir al desarrollo de la agricultura del país.
- Calcular el rendimiento de plantaciones de caña aplicando en la práctica el método propuesto.
- Lograr la captura de imágenes donde se puedan identificar problemas de salud en la planta a partir del cambio de coloración que se manifieste.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2010. *Aplicaciones satelitales multiespectrales: explicación de los reales RGB*. University Corporation for Atmospheric Research.
- ARÉVALO, V. M. G., J. AMBROSIO G. 2002. *La librería de visión artificial OpenCV aplicación a la docencia e investigación*. Universidad de Málaga.
- ATENCIO P., S. G. 2009. *Enfoque geométrico para la estimación del peso del fruto mango de azúcar mediante procesamiento digital imágenes*. Universidad del Magdalena.
- AUEARUNYAWAT P., K. T., WONGMANEEROJ A., NISHIHARA A., KEINPRASIT R. 2012. An Automatic Nitrogen Estimation Method in Sugarcane Leaves Using Image Processing Techniques. *International Conference on Agricultural, Environment and Biological Sciences (ICAEBs'2012)*.
- BALCÁZAR, M. 2011. *Desarrollo de un módulo SIG para el manejo de imágenes multiespectrales orientado a la agricultura de precisión*. .
- BELTRÁN J., P. W., HINOJOZA G. 2011. *Elaboración de cartografía de uso y cobertura del suelo para los municipios de Culiacán y Navolato (Sinaloa, México) a partir de imágenes Landsat 5 TM*. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- BORRA I., P. J. M., TORRES J., LÓPEZ F. 2015. Evaluación de la técnica de resampling en imágenes UAV para la detección de malas hierbas mediante análisis OBIA. *XV Congreso de la Sociedad Española de Malherbología*. Sevilla.
- CÁCERES C., A. D., RAMOS O. 2014. *Procesamiento de imágenes para reconocimiento de daños causados por plagas en el cultivo de Begonia semperflorens (flor de azúcar)*. Universidad Militar Nueva Granada.
- CONSTANTE P., A. Á., CHANG O. 2015. *Diseño e implementación de un sistema de visión artificial para clasificación de al menos tres tipos de frutas*. Escuela Politécnica Nacional.
- DÍAZ J., G. M., GUTIÉRREZ J. 2015. *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Universidad Complutense de Madrid.
- ESCARABAJAL D., M. J. 2014. *Segmentación automática de imágenes de cultivos: estudio comparativo de modelos de color*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- FALLAS, J. 2007. *Modelos digitales de elevación: teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*. Universidad Nacional Autónoma de Costa Rica.
- FERNÁNDEZ G., E. D., RUIZ A., CONESA J., MOLINA J. 2014. A new digital image processing based methodology for determining Kc in lettuce crops in the Southeast of Spain. *Biosystems Engineering* 117.
- FITER, E. L. 2012. *Descripción, comparación y ejemplos de uso de las funciones de la toolbox de procesamiento digital de imágenes de MATLAB®*. Universidad Politécnica de Madrid.
- GUZMÁN P., G. G., RIVILLAS O., OLIVEROS T., 2003. Utilización del procesamiento de imágenes para determinar la severidad de La Mancha de Hierro del Cafeto, en hojas de café. *Cenicafé*, 54.
- KRISHNAN M., J. G. 2013. Pest Control in Agricultural Plantations Using Image Processing. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, 6.
- MRS. LATHA, P. A., REDDY A., KUMAR V. 2014. Image Processing in Agriculture. *International Journal of Innovative Research In Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering* 2.
- OJEDA W., M. A., GONZÁLEZ A., FLORES J. 2015. Los vehículos aéreos no tripulados y la agricultura de precisión. *Reunión Anual de Riego y Drenaje, I CONGRESO NACIONAL COMEII*
- PATIL S., D. B. S. 2011. Leaf disease severity measurement using image processing. *International Journal of Engineering and Technology* 3.

- PEÑA J., T. J., SERRANO A., LÓPEZ F. 2014. *Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV)*. Instituto de Agricultura Sostenible.
- PORTERO C., M. M., SALAS P. 2015. *Incorporación de imágenes aéreas en el manejo del cultivo del maíz*. SONEA Ingeniería y Medio Ambiente. SONEA Ingeniería y Medio Ambiente.
- R., Q. 1995. Fertilización y nutrición. *Cenicaña*, 153-177.
- RINCÓN N., O. M., PÉREZ J. 2012. *Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín
- ROSALES, A. 2013. *Manual para la interpretación de imágenes de sensores remotos de las principales coberturas y usos de la tierra de costa rica*. Instituto de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria.
- SÁNCHEZ G., M. M., SAUMETH E. 2013. Vehículos aéreos no tripulados en Latinoamérica. In: MEDINA, A. F. D. (ed.). Madrid.
- SUNGKUR R., B. S., POLIGADU A. 2013. An Automated System to Recognise Fungi-caused Diseases on Sugarcane Leaves. *Proceedings of Global Engineering, Science and Technology Conference*. Singapore.
- TORRES-SÁNCHEZ, J., J.M. PEÑA-BARRAGÁN, D. GÓMEZ-CANDÓN, A.I. DE CASTRO, & LÓPEZ-GRANADOS, F. 2013. Imagery from unmanned aerial vehicles for early site specific weed management. *Precision agriculture*, 193–199.
- TORRES J., L. F., DE CASTRO A., PEÑA J. 2013. Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management. *PLoS ONE*, 8.
- VELÁZQUEZ N., S. Y., NAKANO K., MEJÍA J., ROMANCHIK E. 2011. Detección de cenicienta en rosa usando procesamiento de imágenes por computadora. *Rev.Chapingo, Ser.Hortic*, 17.