

Análisis de imágenes multispectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados

*Samy Kharuf-Gutierrez, Luis Hernández-Santana, Rubén Orozco-Morales, Osmany de la C. Aday
Díaz, Irenaldo Delgado Mora*

RESUMEN / ABSTRACT

En este trabajo se muestran las experiencias del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) y de la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (ETICA) en la utilización de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) en la fotogrametría multispectral, específicamente en el mapeo de sembrados experimentales de caña de azúcar.

Se realizaron pruebas experimentales con dos de los mejores software de procesamiento de imágenes disponibles en el mercado, Agisoft Photoscan y Pix4D, generándose los ortomosaicos 3D y mapas de índices NDVI (Índice Normalizado Diferencial de Vegetación). Se evalúan ambos programas en cuanto a facilidad de uso, tiempo de procesamiento y calidad visual del producto y se definen las condiciones de vuelo del VANT para un adecuado procesamiento de las imágenes recolectadas con la cámara multispectral Parrot Sequoia. Los resultados indicaron a Pix4D como el programa más eficiente para realizar los cálculos de índices vegetativos, ya que este incorpora correcciones radiométricas específicas a los ortomosaicos. Se analizaron los resultados alcanzados con agrónomos expertos de la ETICA, realizando comparaciones entre los distintos grupos de imágenes procesadas y la correlación entre los mapas de índices con la variedad de caña sembrada, su edad, los niveles de vigor vegetal y otras variables agrícolas. Los resultados obtenidos demuestran que la respuesta espectral permite discriminar los campos en dependencia de la edad y densidad poblacional por parcelas, pero los mapas NDVI no posibilitan determinar las diferentes variedades sembradas en una misma fecha.

Palabras claves: Agricultura de precisión, índices vegetativos, procesamiento de imágenes, Pix4D, Agisoft Photoscan.

This research paper deals with the experiences of the Group of Automation, Robotics and Perception (GARP) of the Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV) and the Territorial Research Station of the Sugarcane (ETICA), in the use of an Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for multispectral photogrammetry, with the aim at mapping experimental sugarcane plantations.

Experimental tests with two of the best image processing software available at the market were done, Agisoft Photoscan and Pix4D, generating 3D orthomosaics and index maps NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Both programs were evaluated in terms of ease of use, processing time, and visual quality of the product, having the flight conditions of the UAV defined for an adequate processing of the images collected with the Parrot Sequoia Multispectral Camera. The results indicated a Pix4D program as the most efficient one to calculate vegetative indexes due to the incorporation of radiometric corrections specific for the orthomosaics. The results achieved were analyzed in collaboration with expert agronomists from ETICA, to make comparisons between the different groups of processed images and the correlation between the index maps with the variety of sugarcane crops, their age, the levels of plant vigor and other agricultural variables. The obtained results show that the spectral response permits to discriminate the fields depending on the age and demographic density in each parcel, but the NDVI don't facilitate the determination of different varieties with the same plantation date.

Key words: Precision agriculture, vegetative indexes, image processing, Pix4D, Agisoft Photoscan.

Analysis of multispectral images acquired with unmanned aerial vehicles.

1. -INTRODUCCIÓN

Con factores actuales como el crecimiento poblacional y la introducción del uso de biocombustibles se hace necesaria una renovación tecnológica en los procesos de agricultura para asegurar su sostenibilidad tanto ambiental como económica, y satisfacer la demanda de productos, por lo cual se justifica la búsqueda y aplicación de nuevas herramientas que permitan mejorar algunos de los problemas actuales en el manejo de los cultivos y los procesos agrícolas, como son la heterogeneidad en rendimiento y calidad en la producción, la ausencia de trazabilidad y el impacto sobre el ambiente por efectos del uso ineficiente de insumos como plaguicidas y fertilizantes [1]. Surge como respuesta, a la solución de estos problemas, la agricultura de precisión y junto con ella el aporte que realizan las herramientas tecnológicas de monitoreo relacionadas, como lo es la teledetección remota basada en sensores multispectrales aerotransportados.

El término Agricultura de Precisión (AP) significa optimizar la calidad y cantidad de un producto agrícola, minimizando el costo a través del uso de tecnologías más eficientes para reducir la variabilidad de un proceso específico, en forma ambientalmente limpia [2].

La agricultura de precisión no se basa solamente en estimar la variabilidad existente en el área, sino también en adoptar un grupo de prácticas que se ejecutan en base a esa variabilidad. Además, es posible georreferenciar y aplicar los insumos con dosis variables en sectores de coordenadas geográficas conocidas [1].

La teledetección es definida como la medición o adquisición de información de un objeto o fenómeno por medio de un equipo que no está en contacto con dicho objeto, siendo las imágenes multispectrales tomadas por aviones tripulados o por los satélites las más utilizadas [3].

Varios son los autores, que han comprobado la relación entre las variables relacionadas directamente con la producción de la planta con datos de sensores remotos. Principalmente el índice de área foliar (LAI), verdor de la hoja, altura, nitrógeno en la hoja, contenido de clorofila, o contenido de agua entre otros [4-9].

En el caso de las coberturas vegetales, las diferencias entre las firmas espectrales de la vegetación sana y estresada son notables y su análisis cuantitativo es posible mediante diversas técnicas como el cálculo de índices vegetativos (IV). Como resultado de estos análisis, se hace posible la realización de diagnósticos en variables claves tales como la productividad [10].

Algunos estudios desarrollados en Cuba presentan una panorámica general de las aplicaciones geomáticas de los VANT, fundamentalmente empleando imágenes RGB [11,12]; quedando aún el mapeo multispectral y el procesamiento de la información recolectada como un tema a desarrollar en profundidad en nuestro país. En [13] se ofrece solamente una visión general de las posibles aplicaciones de la fotogrametría multispectral en áreas cañeras, sin llegar a ningún resultado conclusivo; debiéndose realizar estudios posteriores que impliquen condiciones variables de vuelo, diferentes genotipos de caña y una mayor georreferenciación de los ortomosaicos.

En general, a nivel nacional, existe un insuficiente empleo por parte de los productores, de tecnologías relacionadas con la agricultura de precisión (GPS, monitores de rendimiento, muestreos dirigidos georreferenciados) para la generación de información y conocimiento. En la industria azucarera hay un creciente interés por la aplicación de tecnologías de agricultura de precisión con fines productivos. Poder delimitar ambientes con diferente potencial productivo en un mismo campo de caña sería un buen comienzo para la implementación del manejo sitio-específico en este cultivo a nivel nacional.

A partir de la experiencia transmitida por la empresa USENSE en el marco de la cooperación con el Consejo Interuniversitario Flamenco VLIR, el Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP) de la UCLV ha desarrollado capacidades para manufacturar, mantener y reparar varios modelos de VANT. Actualmente tiene en operación las aeronaves X8-GARP 01 y 3DR RTF X8+; con esta tecnología es posible la adquisición de las imágenes siguiendo un sistema para la planificación de los vuelos a partir de las posibilidades de la aeronave y las necesidades de la aplicación. Una vez tomadas las fotos es necesario su procesamiento con el propósito de crear ortofotos, modelos digitales de elevaciones y mapas de índices. En este caso se emplean los programas Pix4D y Agisoft PhotoScan, orientados a la fotogrametría multispectral.

En este trabajo se aborda la ejecución de un proyecto de fotogrametría multispectral de uno de los campos experimentales de la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (ETICA), sembrados con múltiples variedades de caña de azúcar. Además se utilizan los avances mencionados en la tecnología VANT y las técnicas de procesamiento digital de imágenes orientadas a este campo para la generación de mapas de índices vegetativos, evaluándose diferentes condiciones de vuelo para lograr un solape adecuado de las imágenes tomadas por el sensor Sequoia. Los mapas de índices son interpretados por especialistas en procesamiento de imágenes y expertos agrónomos de la ETICA para identificar el vigor vegetal en zonas puntuales de los campos.

Este trabajo tiene como objetivo realizar un levantamiento fotogramétrico multispectral, utilizando VANT, en las áreas de la ETICA para la elaboración de mapas de índices vegetativos que permitan identificar parcelas de caña por variedades o con baja densidad vegetal, evaluando dos de las mejores aplicaciones propietarias de procesamiento de imágenes disponibles en el mercado, Agisoft Photoscan y Pix4D.

2.- Fotogrametría multispectral con vehículos aéreos no tripulados

El empleo de VANT para la toma de imágenes aéreas de una elevada resolución posee múltiples beneficios sobre el uso de aviones tripulados y satélites con iguales fines, ya que estos pueden brindar una calidad superior en los mapas, operan en el ámbito local y logran sobrevolar áreas inaccesibles.

Las ventajas generales de las plataformas para VANT son expuestas por diversos autores [14,15,12]: Tales como el aumento de la producción respecto a otros métodos tradicionales de trabajo, bajo coste, notable reducción en el tiempo empleado para la recolección de datos, permite la realización de trabajos en zonas de accesibilidad reducida y tienen la capacidad de volar a poca altura posibilitando capturar imágenes con una gran resolución.

Otras aplicaciones de los VANT, se tienen en el campo de defensa y seguridad [16], usos civiles y medioambientales como el monitoreo de la erosión del suelo [17], morfodinámica de cauces [18] y mapeo rápido de zonas afectadas por desastres naturales [19]. Estas plataformas pueden ser capaces de proporcionar fotos con una elevada resolución, necesarias para el manejo de sitios específicos en los cultivos, siendo empleadas también en la investigación agronómica, manejo de cultivos especiales y análisis de variabilidad dentro del campo [20,13]. Con ellos los agricultores pueden identificar las zonas dentro del campo donde los rendimientos pueden ser incrementados, o áreas donde se requieran ajustes en los insumos para mejorar la rentabilidad de las explotaciones y/o la calidad del medio ambiente [15,21].

La captura de imágenes del terreno se realiza simultáneamente en varios rangos del espectro electromagnético llamados bandas. La necesidad de su adquisición radica en las propiedades espectrales (reflectancia, transmitancia y absorbancia, entre otras) del suelo y de las plantas en sus diferentes etapas de desarrollo, las que van ligadas estrechamente a factores como actividad fotosintética, cantidad de agua, clorofila, biomasa, entre otros.

Estas imágenes han sido utilizadas con éxito en agricultura de precisión, ejemplo de ello es su análisis para estimar contenido de carotenoides en hojas de viñedos [22], su utilización para determinar estrés hídrico en las plantas [15], y la generación de modelos de superficie para estimación de rendimiento en cultivos de maíz [23].

La clorofila no absorbe toda la luz del sol uniformemente, las moléculas de clorofila preferentemente absorben la luz roja y azul para usar en la fotosíntesis. En el borde del espectro visible la absorción de la luz roja por los pigmentos de clorofila empieza a disminuir, y la reflectancia se incrementa abruptamente. Entonces, si la reflectancia es considerada no sólo en el visible, pero a través del visible e infrarrojo cercano (NIR), la reflectancia pico de la vegetación viva no está en el verde sino en el infrarrojo cercano (Figura 1). Este comportamiento explica la gran utilidad del espectro NIR para los estudios de vegetación y, por supuesto, simplifica la separación de los sectores con vegetación de los sectores sin vegetación, que son usualmente muy oscuros en el infrarrojo cercano.

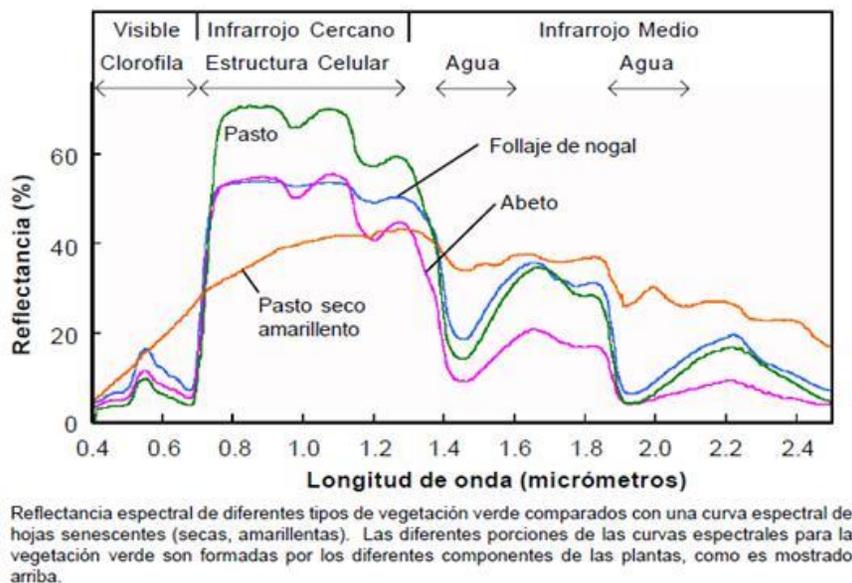


Figura 1

Reflectancia de la vegetación en dependencia de la variedad y el nivel de salud

Con la madurez o estrés en la vegetación por enfermedad, ataques de insectos, o bajos niveles de humedad, las características espectrales de la hoja deben variar. En general estos cambios aparentemente suceden simultáneamente en ambas regiones, visible e infrarrojo, pero los cambios de reflectancia en el infrarrojo son más notables.

Los índices de vegetación son valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un número que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Los valores de índices de vegetación más cercanos a uno identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable, mientras que valores próximos a cero corresponden a zonas de pasto seco o suelo. Entre todos los IV que existen, los más usados y derivables de un sensor multiespectral tribanda son: NDVI (Índice Normalizado Diferencial de Vegetación), GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde) y SAVI (índice vegetativo ajustado al suelo) [21]. De estos el más conocido y usado es el NDVI. Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta.

Numerosos artículos referentes al NDVI se han publicado hasta la actualidad. En [24], se calcula el NDVI para identificar áreas de caña de azúcar y evaluar su condición de salud, permitiendo calcular el área de la superficie terrestre cubierta por el cultivo y qué porción estaba enferma. También en [25], se utilizó el NDVI para demostrar la influencia del déficit de agua en la baja producción de frutas en árboles de manzana.

En [26], se presentan las grandes potencialidades del NDVI para definir el rango y el patrón de verdura de la cubierta del cultivo del trigo y en la estimación del valor de herencia de la expresión verdura en la madurez fisiológica del mismo, independientemente de los efectos de su fenología. A partir de datos NDVI en el trabajo [27] se realizó un estudio a tres variedades de caña de azúcar con diferentes niveles de aplicación de nitrógeno para detectar la biomasa de las mismas. Se demostró la alta correlación existente entre el total de biomasa de cada uno de los tratamientos y dicho índice de vegetación. Informes anteriores han documentado la capacidad del NDVI para estimar el potencial de rendimiento de la caña de azúcar, sin embargo, la mayoría de estos informes se han centrado en plataformas basadas en satélites o sensores pasivos [28-31], con pocos trabajos que demuestren la capacidad de un sensor remoto activo en tierra para estimar variables de interés agrícola en campos de caña de azúcar en zonas tropicales. Además el empleo del sensor Sequoia y la determinación de las condiciones de vuelo con este sensor para un adecuado mapeo de zonas cañeras no se ha encontrado en trabajos previos. El desarrollo de este tipo de trabajos de patronamiento espectrales es definitivamente superior en cultivos como maíz, trigo, arroz y soya.

3.- Equipamiento para la recolección y procesamiento de imágenes agrícolas

El VANT empleado en este proyecto fue el 3DR RTF X8+ (figura 2), que sobresale en el mercado por sus variadas aplicaciones en la fotogrametría.



Figura 2
VANT 3DR RTF X8+

Para planificar el vuelo se emplea el software Mission Planner que es una estación de control en tierra con todas las funciones de proyecto de piloto automático de código abierto APM (Multiplatform Autopilot). Es compatible únicamente con Windows y se puede emplear como una utilidad de configuración o como complemento de control dinámico de un vehículo autónomo. Este software provee una interfaz para establecer los parámetros de ganancia y amortiguamiento de la estrategia de seguimiento del vehículo, programada en el ArduPilot [32,33]. Mission Planner propone una serie de cámaras, incluida la Sequoia empleada en este proyecto, de las cuales conoce sus características y a partir de estas calcula el recorrido del vuelo y la altura sobre el suelo a la que debe sobrevolar el VANT, lo que es fundamental para recolectar imágenes con la resolución adecuada [34].

El sensor Sequoia, desarrollado por los especialistas de Parrot y MicaSense que es empleado en este proyecto, es el de mejor relación calidad precio [13], costando en muchos casos la mitad o menos que sus similares en el mercado y totalmente especializado para aplicaciones de la agricultura de precisión [35]. Las características de este sensor serán evaluadas a continuación.

Principales características del sensor Sequoia:

- Cámara autocalibrada usando el sensor de irradiación (figura 3).

- Cámara RGB: 16 Mpx, tamaño del píxel de 1.34 μm y distancia focal de la lente de 4.88 mm.
- Tasa de toma fotográfica de 1 foto por segundo.
- 4 cámaras espectrales: 1.2 Mpx, tamaño del píxel de 3.75 μm y distancia focal de la lente de 3.98 mm
- Independiente del dron.
- Protocolo estándar PTP para la comunicación con los drones.



Figura 3
Dimensiones del sensor Sequoia.

En el mercado existen gran cantidad de softwares para el procesamiento de imágenes con fines agrícolas; en [13], se realiza un análisis de estos softwares, entre los que se encuentran Data Mapper, Eagle View, ENVI, Agro Vision-Vision Studio, Drone Mapper, PAM, ERDAS Imagine, Ensomosaic, QGIS, Agisoft PhotoScan, Pix4Dmapper, entre otros. Siendo los dos últimos las mejores soluciones de fotogrametría para realizar el procesamiento de las imágenes multiespectrales y el cálculo automático de los IV en plataformas de escritorio [13].

Agisoft PhotoScan es una solución de software no libre de fotogrametría para la generación automática de modelos de textura poligonales, ortomosaicos georreferenciados y DEMs / DTMs (Modelos Digitales del Terreno). El cálculo de índices vegetativos le fue agregado recientemente aprovechando su capacidad de procesamiento de imágenes multiespectrales. Agisoft se emplea en la fotogrametría aérea para múltiples aplicaciones de la industria como la minería, la agricultura, el mapeo aéreo, la arqueología, arquitectura, los efectos visuales entre otros [35-38].

Los desarrolladores del software Pix4D se unieron con la compañía Parrot para crear Pix4Dmapper Ag. Este software ha sido ampliamente empleado en aplicaciones de la agricultura de precisión y topografía [20,14,39], permite convertir miles de imágenes 2D en mosaicos georreferenciados y modelos 3D precisos y personalizables para una amplia gama de aplicaciones GIS y CAD. Este software fue lanzado en conjunto con el sensor multiespectral Sequoia de Parrot, el cual también fue diseñado específicamente para la agricultura de precisión. La licencia tiene un costo de 6500 USD que incluye la adquisición del sensor Sequoia. La unión entre estos dos elementos y las potencialidades que ofrecen garantizan calidad y rapidez en la adquisición y el procesamiento de imágenes NIR e IR de alta resolución y la generación de IV de los cultivos a partir de las mismas. Para la realización de este trabajo se disponen de varias computadoras en red con las características siguientes: Quad core Intel core i5 3470, sistema operativo Window 10, 16 GB de RAM y tarjeta gráfica Nvidia GeForce GT630.

Los mapas de índices generados son NDVI, ya que luego de cotejar con los especialistas de la ETICA y los expertos en procesamiento multiespectral del GARP este es el índice que mayor información ofrece del estado biológico de la planta y su futura evolución [40].

4.- Procedimiento para la toma y el procesamiento de las imágenes multiespectrales.

Utilizando el vehículo 3DR RTF X8+ y de acuerdo con [13], se planificaron y realizaron los vuelos mediante el software Mission Planer, para lo cual se tuvieron en cuenta aspectos generales (alturas permitidas, obstáculos, vientos, puntos de lanzamiento y aterrizaje) y específicos del vuelo (altura, velocidad, coordenadas, características de las cámaras y software para definición del polígono del área de influencia). El objetivo de los vuelos era mapear las áreas de experimentos de la caña de azúcar de la ETICA Villa Clara y la posterior generación de los ortomosaicos RGB y multiespectrales mediante Agisoft y Pix4D para correlacionarlos con los niveles de población y vigor vegetal de las parcelas; evaluando las prestaciones y consumo de recursos computacionales de ambas aplicaciones de procesamiento de imágenes.

El terreno sobrevolado constaba de un campo de caña de 14 meses (ya en fase de maduración), sembrado con 14 variedades diferentes, y otro campo de caña de 6 meses (en fase de crecimiento) sembrado con 25 variedades; las variedades fueron sembradas en un diseño de bloques al azar en condiciones de secano. Cada variedad ocupa una parcela que mide 6.4 m de

largo y 6.4 m de ancho (41 m²), las parcelas están formadas por 4 surcos, con un surco barrera en ambos laterales. La dosificación del campo de 14 meses fue 217.39 kg/ha de Urea, 212.76 kg/ha de Superfosfato Triple, 333.33 kg/ha de KCL (Cloruro de potasio); al campo de 6 meses se le suministraron 212.76 kg/ha de Superfosfato Triple y 333.33 kg/ha de KCL (Cloruro de potasio). Se realizaron tres vuelos a diferentes alturas, 40 metros (vuelo I), 80 metros (vuelo II) y 120 metros (vuelo III), todos a una velocidad de 6 m/s; los resultados presentados en este trabajo corresponden a esta última altura de vuelo ya que arrojó buenos resultados de resolución y permitió mapear un área mucho mayor. El tamaño del pixel del suelo (GSD) de las ortofotos realizadas fue de 3 cm/pixel, 7 cm/pixel y 11 cm/pixel para el sensor multispectral y de 2cm/pixel, 3cm/pixel y 5cm/pixel para el sensor RGB en función de las respectivas alturas de vuelo y las características técnicas de la cámara.

La realización del vuelo incluyó activación de la ruta, revisión de puntos de referencia, lanzamiento, rutina de vuelo en modo automático, captura continua de fotos y aterrizaje. Para la obtención de mejores resultados, los vuelos se realizaron de las 11:30 hasta las 13:00 horas, ya que es el momento del día con mayor actividad fotosintética debido a la mayor radiación solar incidente. En la Figura 4 se muestran todos los pasos ejecutados para la recolección y procesamiento de las imágenes RGB y multispectrales.

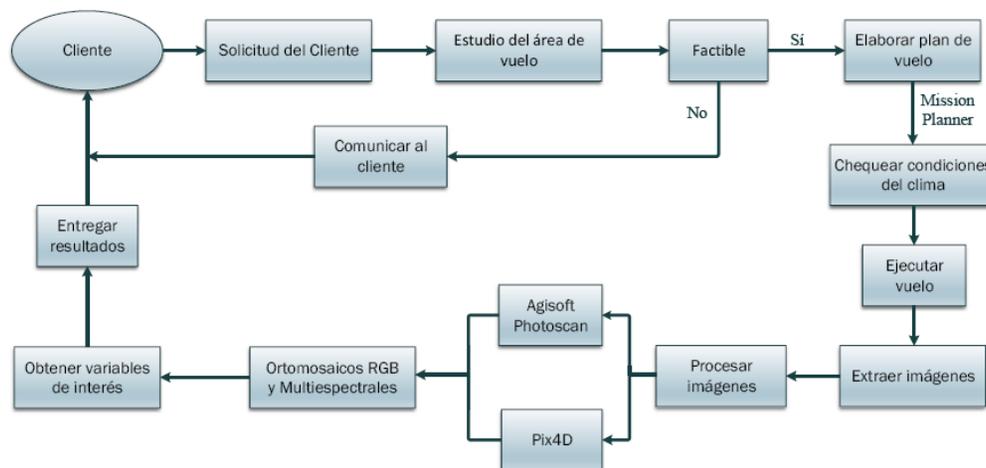


Figura 4

Flujo de trabajo para obtener mapas de índices de un campo de cultivo.

En la construcción de los mosaicos RGB y NIR del área de estudio, se georreferenciaron y procesaron las fotografías en los software Agisoft y Pix4D, detectando zonas con menor cantidad de fotos y otras con mayor densidad de fotos y errores registrados en el proceso de captura de las imágenes por desviaciones posiblemente ocasionadas por ráfagas de viento. Se realizó el modelado en 3D del área o Digital Surface Model (DSM) y el modelo digital de elevación (DEM) de los vuelos a 80 metros y 120 metros, que permiten identificar el nivel de densidad de caña por parcela, diferenciar la caña en fase de maduración de la más joven y realizar mediciones de área y perímetro del campo con un error menor de 1 metro. Las parcelas de 18 meses se pueden apreciar con un color pardo en la Figura 5 enmarcadas dentro de las flechas azules; las parcelas de 6 meses se observan en el sector inferior derecho de la Figura 5 en verde claro, debido al elevado nivel de clorofila de la caña durante el “gran período de crecimiento” (entre 3 y 7 meses luego de la siembra) [41]. Además, se incorporaron cuatro puntos georreferenciados en el campo y se mejoró la precisión de la ortofoto generada (Figuras 5). Para la introducción de puntos de apoyo Agisoft PhotoScan ofrece una manera más sencilla que supone un ahorro de tiempo en el proceso, ya que al introducir un punto georreferenciado el software busca ese punto automáticamente en todas las fotos en que lo halle, en cambio en Pix4D se debe buscar el punto foto a foto. El tiempo de procesamiento requerido por el software Agisoft fue dos horas menor que el que precisó Pix4D con la arquitectura de hardware disponible en el grupo, debido fundamentalmente a que Agisoft permite un procesamiento donde el trabajo se distribuye en varios nodos de ordenadores conectados a una red local. No hay una gran diferencia en la calidad visual de los ortomosaicos RGB generados con ambos software, obteniéndose una resolución en ambos de 5cm/pixel a 120 metros de altura.



Figura 5

Ortomosaico RGB construido con Pix4D volando a 120 metros de altura con 4 puntos de control foto insertados en los extremos de las flechas azules

El procesamiento de las imágenes del vuelo I, a 40 metros de altura y velocidad de 6m/s con un tiempo entre disparos de 1.4 segundos y velocidad del viento 1-2 m/s, no muestra buenos resultados en la reconstrucción de las imágenes RGB, aunque ofrece la mejor resolución con las imágenes multiespectrales. Como se puede observar en las figuras 6 y 7, se produjeron varios huecos en la zona central de la ortofoto RGB debido a que no se logra el solape necesario, para ambos software de procesamiento, con estas condiciones de altura y de velocidad de vuelo, en concordancia con los datos brindados por el fabricante de la cámara, donde se sugiere a esa altura y velocidad desactivar el sensor RGB. Las imágenes RGB son necesarias para la determinación de catastros, límites de terrenos o modelado en 3D de áreas. Por ello, desactivar el sensor RGB cuando el objetivo es el cálculo de IV puede ser lo más correcto con vistas a mejorar la resolución de las imágenes multiespectrales volando a menor altura.

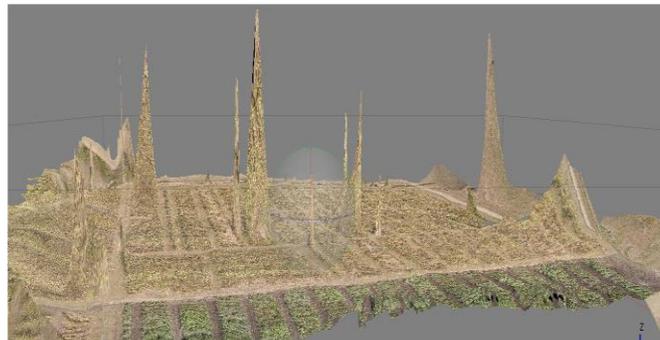


Figura 6

Ortomosaico RGB desde 40 metros de altura construido con Agisoft. En la zona central se aprecian distorsiones cónicas debido a una mala reconstrucción por falta de solape.

Los mosaicos obtenidos a 80 y 120 metros fueron analizados y procesados para la obtención del índice NDVI y se hizo una identificación de puntos de respuesta espectral específica en el cultivo. El mapa NDVI fue evaluado con varios expertos de la ETICA corroborándose la relación entre sectores con elevados niveles de NDVI y bloques de caña con un alto vigor vegetal. Las parcelas deben evaluarse agrupándose por la edad en la que fueron sembradas, ya que la caña en crecimiento mostrará un índice NDVI más alto que la caña madura (debido a una mayor intensidad del verde en la caña joven); estos valores variables no indican que la caña joven sea más saludable que la madura, sino que se encuentran solamente en ciclos biológicos diferentes. Los mapas de índices NDVI generados facilitan la interpretación directa de los parámetros biofísicos de las parcelas que hayan sido sembradas en igual fecha; permitiendo, gracias a que los mapas están georreferenciados, que el agricultor conozca de manera exacta el área de su campo cubierta por cultivos saludables y que sectores de caña presentan

déficit nutricional. Esto permite determinar la cantidad de fertilizante necesaria antes de realizar la compra de los insumos y aplicarlos solamente en los sectores estresados, lo que conlleva a un ahorro monetario significativo.

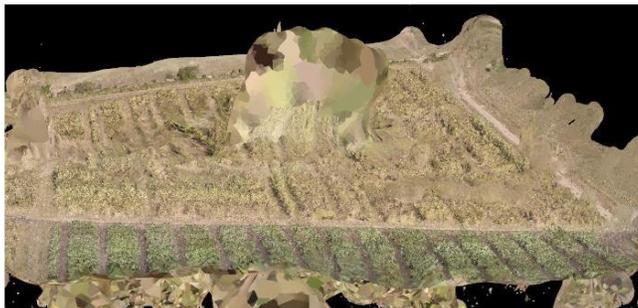


Figura 7

Modelo 3D obtenido con el software Pix4D a 40 metros de altura. En la zona central se aprecia una distorsión total debido a un insuficiente solape de las imágenes recolectadas por el VANT.

En la Figura 8 se pueden apreciar las variaciones del vigor vegetal y los niveles de clorofila que se manifiestan en los cultivos de caña de azúcar, pudiéndose caracterizar su distribución espacial, así como su evolución a lo largo del tiempo. El mapa NDVI obtenido permite clasificar las parcelas dispersas a lo largo del campo, en dependencia de si la respuesta espectral es alta, baja o nula y en base a esta información trazar planes para una dosificación diferenciada de insumos. La correlación entre los valores de NDVI y el estado de salud de las plantas es alta, de manera tal que se muestran los mayores valores de índice NDVI (superior a 0.49 de acuerdo a los expertos) en las parcelas más saludables, bajos valores (entre 0.21 y 0.39) en las parcelas más afectadas por estrés nutricional o pobre densidad poblacional y casi nulos (NDVI por debajo de 0.21) en los sectores de vegetación pobre o suelo. Esta información fue validada directamente en el campo por los investigadores de la ETICA a partir del número de tallos, nivel de salud vegetal y altura de la caña en cada una de las parcelas evaluadas.

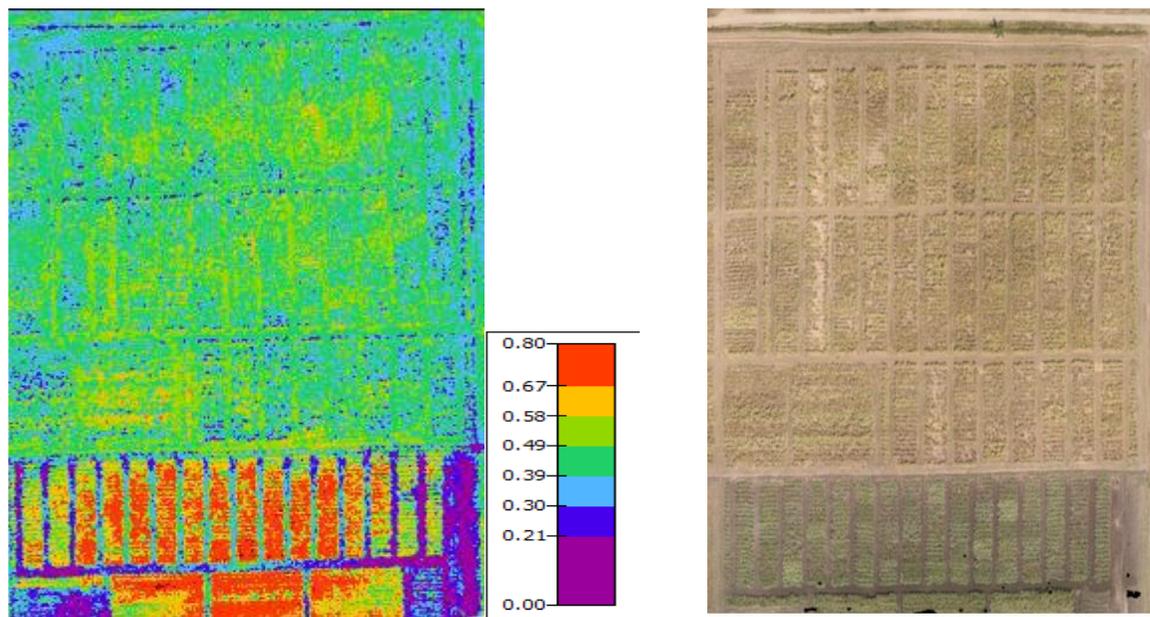


Figura 8

Mapas del índice vegetativo NDVI (izquierda) y ortofoto RGB (derecha) obtenidos en Pix4D representando el valor 0.8 de la escala el máximo nivel de vigor vegetal y los valores más cercanos a cero zonas con despoblamiento vegetal o suelo

En el mapa de índice generado por Pix4D (Figura 9 derecha) los valores de NDVI predominantes oscilan entre 0.5 y 0.8, mientras que con Agisoft PhotoScan (Figura 9 izquierda) prevalecen valores en el rango de 0.2 a 0.5; esta información es fácilmente obtenida ya que ambos softwares permiten conocer el valor promedio del índice y el por ciento del área que

ocupa en el mapa. Las discrepancias entre los valores de los dos programas se deben a que Pix4D aplica correcciones radiométricas que permiten normalizar las imágenes y comparar diferentes imágenes en la misma escala, aprovechando la ventaja de que este software y la cámara multispectral Sequoia pertenecen a la misma compañía. Por lo tanto, si se desea elaborar un mapa de índices vegetativos y el sensor escogido para capturar las imágenes es el Parrot Sequoia, el software Pix4D es el más adecuado para realizar los cálculos de índices vegetativos ya que este incorpora correcciones radiométricas específicas para este sensor, mientras Agisoft PhotoScan no ofrece esta potencialidad.

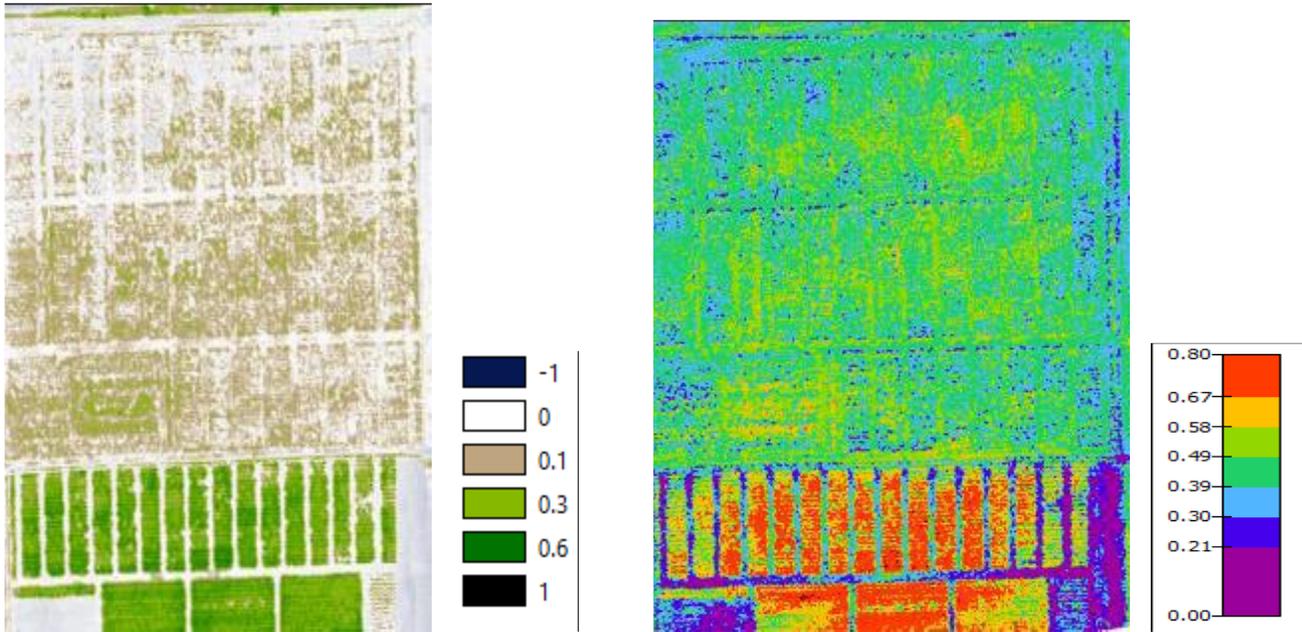


Figura 9

Mapa de NDVI con Agisoft PhotoScan (izquierda) y con Pix4D (derecha) representando el valor 1 de la escala el máximo nivel de vigor vegetal y los valores más cercanos a cero zonas con desplamamiento vegetal o suelo

En las figuras 10 y 11 (correspondientes a caña de 18 meses en fase de maduración) se puede apreciar cómo mediante el mapa de índices NDVI son fácilmente reconocibles sectores de un elevado vigor vegetal.



Figura 10

Ortofoto RGB obtenida con Agisoft PhotoScan desde 120 metros de altura.



Figura 11

Mapa NDVI obtenido con Agisoft PhotoScan desde 120 metros de altura. Las zonas blancas corresponden a suelo o sectores con baja densidad vegetal y los puntos de un verde más intenso a vegetación de mayor nivel de clorofila.

Se realizó otro experimento para intentar diferenciar las distintas variedades de caña en cada parcela mediante el índice NDVI. Haciendo uso del software de procesamiento de imágenes Pix4d se analizó la imagen multispectral de un bloque que contenía las variedades de caña C266-70, C46-12, C86-12, C86-56, todas de 6 meses de vida (Figura 12). Se puede observar que el mapa de índice NDVI, aunque permite evaluar los niveles de clorofila en una plantación que haya sido sembrada en la misma fecha, no posibilita identificar las diferentes variedades sembradas al arrojar todas valores prácticamente homogéneos de NDVI (ver tabla 1).

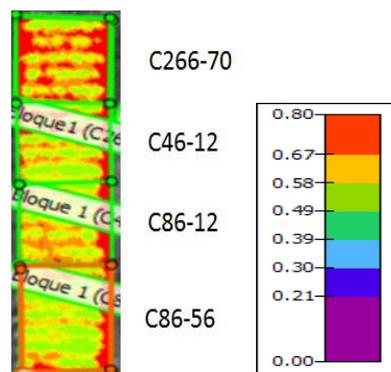


Figura 12

Mapa NDVI obtenido con Pix4d de una parcela de las variedades de caña C266-70, C46-12, C86-12, C86-56. Cada variedad está encerrada en un cuadrado verde claro. A valores más cercanos de 0.8 mayor vigor vegetal de las plantaciones

Tabla 1
Valor del índice NDVI por variedad de caña

| Variedad de Caña de azúcar | Nivel del índice NDVI Mínimo | Nivel del índice NDVI Promedio | Nivel del índice NDVI Máximo |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| C266-70 | 0.22 | 0.64 | 0.85 |
| C46-12 | 0.22 | 0.66 | 0.87 |
| C86-12 | 0.22 | 0.68 | 0.87 |
| C86-56 | 0.22 | 0.69 | 0.87 |

5.- CONCLUSIONES

La UCLV dispone y domina la tecnología de fotogrametría aérea basada en vehículos aéreos no tripulados, tanto para la adquisición de las imágenes como para su procesamiento. Las pruebas realizadas demuestran que no es posible obtener ortomosaicos RGB, sin distorsiones ni huecos, volando a 40 metros de altura y a una velocidad de vuelo de 6 m/seg empleando el sensor Sequoia. Sin embargo, en la elaboración de los ortomosaicos multiespectrales se alcanzaron buenos resultados para todas las alturas de vuelo; corroborándose que el valor de la cámara Parrot Sequoia es fundamentalmente para la captura de imágenes multiespectrales y que la banda RGB es un valor agregado. Se evidenció que aunque el software Agisoft requiere un menor gasto de recursos computacionales, tiempo de procesamiento y su interfaz es más amigable para construir los ortomosaicos, el software Pix4D es una herramienta de mayor potencia y flexibilidad en la generación de los distintos tipos de índices vegetativos y ofrece resultados más exactos.

La ortofoto NDVI generada permitió la selección de las parcelas, en dependencia de su vigor vegetal, para inspección en el campo y evidenció que la respuesta espectral permite identificar problemas en el cultivo. Los mapas de índice NDVI no permitieron identificar las diferentes variedades de caña en un campo sembrado en la misma época, aunque sí posibilitaron evaluar el estado de salud en cada sector.

De esta manera, los aviones no tripulados representan una excelente herramienta por la facilidad de montar cámaras multiespectrales y obtener imágenes con una resolución de 11 cm/pixel, volando a 120 metros de altura, las cuales permiten identificar problemas y tomar medidas en áreas específicas de los cultivos que se encuentran enfermos. Con ellos, se pueden hacer análisis y censos puntuales de alta precisión, con fotografías de 5,0cm/pixel a 100,0m lo que puede disminuir el tiempo y trabajo no solo en zonas de difícil acceso, sino también en grandes extensiones.

REFERENCIAS

1. Best S, Zamora I. Tecnologías aplicables en Agricultura de Precisión. Uso de tecnología de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos. Santiago de Chile: Fundación para la Innovación Agraria; 2008.
2. GARCÍA-CERVIGÓN D, JOSÉ J. Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS\RPAS y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión: UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID 2015. Disponible en: http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
3. García-Ferrer A. Potencialidad y nuevas orientaciones en el uso de la teledetección en agricultura y selvicultura. *Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente*. 2013(105):6-15.
4. Serrano L, Filella I, Penuelas J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*. 2000;40(3):723-31.
5. Thenkabail P, Smith R, De Pauw E. Hyperspectral vegetation indices for determining agricultural crop characteristics, CEO research publication series No. 1. Center for Earth Observation, Yale University Press, New Haven. 1999.
6. Osborne S, Schepers JS, Francis D, Schlemmer MR. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. *Agronomy journal*. 2002;94(6):1215-21.
7. Goel NS. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*. 1988;4(1):1-212.

Samy Kharuf, Luis Hernández, Rubén Orozco, Osmany de la C. Aday, Irenaldo Delgado
RIELAC, Vol. XXXIX 2/2018 p. 79-91 Abril - Agosto ISSN: 1815-5928

8. Lee K-S, Cohen WB, Kennedy RE, Maiersperger TK, Gower ST. Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sensing of Environment*. 2004;91(3):508-20.
9. Wright DL, Rasmussen VP, Ramsey RD, Baker DJ, Ellsworth JW. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. *GIScience & Remote Sensing*. 2004;41(4):287-300.
10. Meneses VAB, Téllez JM, Velasquez DFA. Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. @ limentech, *Ciencia y Tecnología Alimentaria*. 2015;13(1).
11. Fernandez PM, Martínez DO, García EP, Lorenzo FB, editors. Vehículos aéreos no tripulados (vant) en cuba, aplicados a la Geomática. Estado actual, perspectivas y desarrollo. XV Encuentro de Geógrafos de América Latina 2015; Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba.
12. Hernández L, Rodríguez E, Martínez A, Álvarez H, Kharuf S, Morales LH, editors. LEVANTAMIENTO FOTOGRAFOMETRICO DE LA UBPC “DESEMBARCO DEL GRANMA” UTILIZANDO AVIONES NO TRIPULADOS, SOLUCIÓN DE BAJO COSTO PARA LA AGRICULTURA NACIONAL. VII Edición de la Conferencia Científica Internacional sobre Desarrollo Agropecuario y Sostenibilidad 2016; Hotel Memories Paraiso Azul, Cayo Santa Maria, Caibarien, Cuba.
13. Hernández Santana L, Martínez A, García D, Delgado I, Hernández Morales LE, editors. Fotogrametría aérea basada en Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT). Solución de bajo costo para la Agricultura Nacional. XVII Simposio Internacional de Ingeniería Eléctrica SIE 2017; 2017; Varadero.
14. Basso B. Perspectivas y avances del uso de UAV en AP en USA. Curso Internacional de Agricultura de Precisión 13 2014 09 24-25, 24 y 25 de septiembre 2014 Manfredi, Córdoba AR. 2014.
15. Gago J, Douthe C, Coopman R, Gallego P, Ribas-Carbo M, Flexas J, et al. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*. 2015;153:9-19.
16. Yilmaz M, Krein PT. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013;28(5):2151-69.
17. d'Oleire-Oltmanns S, Marzolf I, Peter KD, Ries JB. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing*. 2012;4(11):3390-416.
18. Miřijovský J, Langhammer J. Multitemporal monitoring of the morphodynamics of a mid-mountain stream using UAS photogrammetry. *Remote Sensing*. 2015;7(7):8586-609.
19. Gomez C, Purdie H. UAV-based Photogrammetry and Geocomputing for Hazards and Disaster Risk Monitoring—A Review. *Geoenvironmental Disasters*. 2016;3(1):23.
20. Romero VR, Villareal AM, León JLT, Hernández AH. Perspectivas de la tecnología VANT en el cultivo de palma de aceite: monitorización del cultivo mediante imágenes aéreas de alta resolución. *Revista Palmas*. 2015;36(3):25-41.
21. Candiago S, Remondino F, De Giglio M, Dubbini M, Gattelli M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote Sensing*. 2015;7(4):4026-47.
22. Zarco-Tejada PJ, Guillén-Climent M, Hernández-Clemente R, Catalina A, González M, Martín P. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agricultural and forest meteorology*. 2013;171:281-94.
23. Geipel J, Link J, Claupein W. Combined spectral and spatial modeling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system. *Remote Sensing*. 2014;6(11):10335-55.
24. Rahman MR, Islam A, Rahman MA. NDVI derived sugarcane area identification and crop condition assessment. *Plan Plus*. 2004;1(2):1-12.
25. Virlet N, Costes E, Martinez S, Kelner J-J, Regnard J-L. Multispectral airborne imagery in the field reveals genetic determinisms of morphological and transpiration traits of an apple tree hybrid population in response to water deficit. *Journal of experimental botany*. 2015;66(18):5453-65.
26. Lopes MS, Reynolds MP. Stay-green in spring wheat can be determined by spectral reflectance measurements (normalized difference vegetation index) independently from phenology. *Journal of Experimental Botany*. 2012;63(10):3789-98.
27. García C, Herrera F. Percepción remota en cultivos de caña de azúcar usando una cámara multiespectral en vehículos aéreos no tripulados. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, João Pessoa-PB, Brasil. 2015;25.
28. Lofton J, Tubana BS, Kanke Y, Teboh J, Viator H, Dalen M. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. *Sensors*. 2012;12(6):7529-47.
29. Zhao Y, Della Justina D, Kazama Y, Rocha JV, Graziano PS, Lamparelli RAC, editors. Dynamics modeling for sugar cane sucrose estimation using time series satellite imagery. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII*; 2016: International Society for Optics and Photonics.

Samy Kharuf, Luis Hernández, Rubén Orozco, Osmany de la C. Aday, Irenaldo Delgado
RIELAC, Vol. XXXIX 2/2018 p. 79-91 Abril - Agosto ISSN: 1815-5928

30. Johansen K, Sallam N, Robson A, Samson P, Chandler K, Derby L, et al. Using GeoEye-1 Imagery for Multi-Temporal Object-Based Detection of Canegrub Damage in Sugarcane Fields in Queensland, Australia. *GIScience & Remote Sensing*. 2017(just-accepted).
31. Martínez LJ. Relationship between crop nutritional status, spectral measurements and Sentinel 2 images. *Agronomía Colombiana*. 2017;35(2):205-15.
32. Hernández-Morales L, Valeriano-Medina Y, Hernández-Julián A, Hernández-Santana L. Estudio sobre la estrategia de guiado L1 para el seguimiento de caminos rectos y curvos en UAV. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 2017;38(3):14-25.
33. Valeriano-Medina Y, Hernández-Julián A, Hernández Santana L. Controlador ILOS para el seguimiento de caminos en línea recta de un vehículo autónomo subacuático. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. 2015;36(2):15-28.
34. Torres-Sánchez J, Peña-Barragán J, Gómez-Candón D, De Castro A, López-Granados F. Imagery from unmanned aerial vehicles for early site specific weed management. *Precision agriculture '13*: Springer; 2013. p. 193-9.
35. Baiocchi V, Dominici D, Mormile M. UAV application in post-seismic environment. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci, XL-1 W*. 2013;2:21-5.
36. Peña J, Torres-Sánchez J, Serrano-Pérez A, López-Granados F. Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). *Revista de Teledetección*. 2014(42):39-48.
37. Lucieer A, Jong SMD, Turner D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*. 2014;38(1):97-116.
38. Bendig J, Willkomm M, Tilly N, Gnyp M, Bennertz S, Qiang C, et al. Very high resolution crop surface models (CSMs) from UAV-based stereo images for rice growth monitoring in Northeast China. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*. 2013;40:45-50.
39. Suh J, Choi Y. Mapping hazardous mining-induced sinkhole subsidence using unmanned aerial vehicle (drone) photogrammetry. *Environmental Earth Sciences*. 2017;76(4):144.
40. Olexa EM, Lawrence RL. Performance and effects of land cover type on synthetic surface reflectance data and NDVI estimates for assessment and monitoring of semi-arid rangeland. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014;30:30-41.
41. Ferrer Reyes M, Roque Rodés R, Lamelas Felipe C, González Marrero A. Relación entre el tiempo térmico acumulado durante el gran periodo de crecimiento con los rendimientos agrícolas de la caña de azúcar. *Centro Agrícola*. 2016;43(4):73-8.

AUTORES

Samy Kharuf Gutierrez. Ingeniero en Automática, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba, kharuf@uclv.cu

Luis Hernández Santana. Ingeniero en Automática, Doctor en Ciencias Técnicas, Facultad de Ingeniería Eléctrica Universidad Central de Las Villas, Santa Clara Cuba luishs@uclv.edu.cu

Rubén Orozco Morales. Ingeniero en Electrónica, Máster en Telecomunicaciones (1994), Doctor en Ciencias Técnicas (1998), Facultad de Ingeniería Eléctrica Universidad Central de Las Villas, Santa Clara Cuba, rorozco@uclv.edu.cu

Osmany de la C. Aday Díaz, Doctor en Ciencias Técnicas, Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Santa Clara Cuba, osmany.adad@inicavc.azcuba.cu

Irenaldo Delgado Mora, Doctor en Ciencias Técnicas, Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Santa Clara Cuba, irenaldo.delgado@inicavc.azcuba.cu



Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License