

Original Research / Artículo original - Tipo 1

# Development of a multispectral system for precision agriculture applications using embedded devices

**Angie Katherine Torres Galindo** / angie.torres.galindo@unillanos.edu.co

**Andrés Felipe Gómez Rivera** / andres.gomez.rivera@unillanos.edu.co

**Andrés Fernando Jiménez López, MSc.** / ajimenez@unillanos.edu.co

Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Departamento de Matemáticas y Física, Grupo de Investigación Macrypt  
Universidad de los Llanos, Villavicencio-Colombia

**ABSTRACT** This document shows advances in the development of prototypes to acquire remote sensing information in Unmanned Aerial Vehicles for applications in precision agriculture. We present the development of two prototypes consisting of multispectral cameras for the blue, green, red, and near infrared bands using Tiva® C Series LaunchPad and Raspberry Pi development boards, which presented substantial differences in processing time and images storage. In this document, we describe the design and development of a multispectral information acquisition system to analyze vegetal coverage, initially in an African oil palm plantation. This system couples with an Unmanned Aerial Vehicle, allowing latitude and longitude maneuverability. This improves the data gathering efficiency in small plots, increasing the spatial and temporal resolution from a system controlled on the ground.

**KEYWORDS** Precision agriculture; Python; remote sensing; software; wireless.

Desarrollo de un sistema multiespectral para aplicaciones en agricultura de precisión usando dispositivos embebidos

**RESUMEN** Este documento muestra los avances en el desarrollo de prototipos para adquirir información de sensado remoto en vehículos aéreos no tripulados para aplicaciones en agricultura de precisión. Se desarrollaron dos prototipos de cámara multiespectral para las bandas del azul, verde, rojo e infrarrojo cercano, usando las tarjetas Tiva™ C Series LaunchPad y Raspberry Pi B, con diferencias sustanciales en el tiempo de procesamiento y almacenamiento de las imágenes. En este documento se describe el diseño y desarrollo de un sistema de adquisición de información multiespectral con el objetivo de analizar coberturas vegetales, inicialmente en plantaciones de palma de aceite. Este módulo de adquisición de información en campo se acopla a un Vehículo Aéreo no Tripulado; permitiendo maniobrabilidad en latitud y longitud, para de esta manera mejorar la eficiencia en la adquisición de datos espectrales en lotes pequeños, aumentando la resolución espacial y temporal con un sistema controlado desde tierra.

**PALABRAS CLAVE** Agricultura de precisión; inalámbrico; python; software; teledetección.

Desenvolvimento de um sistema multiespectral para aplicações na agricultura de precisão, utilizando dispositivos embarcados

**RESUMO** Este documento mostra o progresso no desenvolvimento de protótipos para adquirir informações de sensoriamento remoto em veículos aéreos não tripulados para aplicações em agricultura de precisão. Foram desenvolvidos dois protótipos de câmera multiespectral para as bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho-próximo usando os cartões Tiva™ C Series LaunchPad e Raspberry Pi B, com diferenças substanciais no tempo de processamento e armazenamento de imagens. Este documento descreve a concepção e o desenvolvimento de um sistema de aquisição de informação multiespectral, com o objetivo de analisar coberturas vegetais, inicialmente em plantações de óleo de palma. Este módulo de aquisição de informações de campo é acoplado a um Veículo Aéreo não tripulado; permitindo capacidade de manobra em latitude e longitude, para melhorar assim a eficiência na obtenção de dados espectrais em pequenos lotes, aumentando a resolução espacial e temporal com um sistema controlado a partir de terra.

**PALAVRAS-CHAVE** Agricultura de precisão; sem fio; python; software; sensoriamento remoto.

## I. Introduction

The current global situation in topics related with the environment and optimization of the use of natural resources, mainly in cultivated areas, has increased interest in the estimation of bio-geophysical processes on a major scale regarding their temporal and spatial variability. There is a strong climatic changeability caused by disturbances and changes in the use of soil, modification in patterns of nutrients accumulation, and the growth of the urban population –along with reduction of the rural population–, which produce urgent needs to double agricultural production by 2035, using less water in fewer soils; consequently, this entails higher environmental, economic, and social costs. Due to this, since the last decade of the 20th century, some technological tools have begun to be used in the agricultural sector, which allow the handling of information databases to manage relevant data from crops, within the so-called Precision Agriculture [PA] (Srinivasan, 2006).

PA is an eco-friendly strategy where farmers can modify inputs and cultivation methods at several stages, i.e., in sowing, application of fertilizers, herbicides, pesticides, watering, and other farming techniques, as well as with harvesting and with consideration of spatial and temporal variability in fields (Srinivasan, 2001). This methodology looks for the application of agricultural supplies at the right place and time, in order to enhance crop yield, reduce costs, and decrease the use of agrochemicals (Jiménez, Ravelo & Gómez, 2010). A crop management system based on PA seeks answers to the following generic agricultural questions:

- Location: where is it? Useful to determine the kind of crop that exists in a determined place. It is characterized in this case by geographic references like latitude and longitude.
- Condition: how does it look like? Suitable to know what is happening on the land.
- Trend: what has changed since...? An important question, since it involves the previous ones and the answer establishes what differences occur in a determined area or plot through time.

The tools to acquire and analyze information to answer these questions are tele-detection (or remote sensing) systems, crop variable following systems (i.e. phytomonitoring, either with sensor networks or in-field information acquisition systems), systems for harvesting

## I. Introducción

La situación mundial en temas relacionados con el medio ambiente y la optimización del uso de los recursos naturales, principalmente en áreas cultivadas, ha aumentado el interés en estimar variaciones en los procesos biogeofísicos a gran escala en relación con su variabilidad temporal y espacial. Existe una fuerte variabilidad climática causada por: los disturbios y cambios en el uso de la tierra; la alteración en los patrones de acumulación de nutrientes; y el crecimiento de la población urbana, con reducción en la población rural; que genera la necesidad urgente de duplicar la producción agrícola para 2035, con menos tierra y con menos agua, lo cual inevitablemente envuelve costos ambientales, económicos y sociales. Debido a esto, desde la última década del Siglo XX se han utilizado ciertas herramientas tecnológicas a nivel mundial que permiten manejar bases de datos de información relevante de los cultivos para la gestión de actividades agrícolas, dentro de la denominada Agricultura de Precisión [AP] (Srinivasan, 2006).

La AP es una estrategia ambientalmente amigable, en donde los agricultores pueden variar las entradas y los métodos de cultivo en distintos estados, es decir, en la aplicación de labranza, siembra, fertilizantes, herbicidas, pesticidas y riego, y en la recolección del producto, teniendo en cuenta la variabilidad espacial y temporal en campo (Srinivasan, 2001); esta metodología busca aplicar insumos agrícolas en el lugar y el instante adecuados para mejorar la producción, disminuir sus costos y reducir el uso de agroquímicos (Jiménez, Ravelo & Gómez, 2010). Un sistema de gestión de cultivo basado en AP busca responder a las siguientes preguntas genéricas en agricultura:

- Localización: ¿dónde está?, de esta forma se determina qué tipo de cultivo hay en un lugar, lo cual puede describirse, en este caso, por referencias geográficas, como latitud y longitud.
- Condición: ¿cómo se encuentra?, que busca conocer qué está ocurriendo en campo.
- Tendencia: ¿qué ha cambiado desde...?, pregunta de vital importancia ya que involucra a las dos anteriores y su respuesta establece qué diferencias ocurren en un área o lote a través del tiempo.

Las herramientas útiles para adquirir y analizar información que permitan responder, con bases sólidas, estas preguntas son: los sistemas de teledetección, los sistemas de seguimiento de variables de cultivo –fitomonitorio, sea con redes de sensores o con sistemas de adquisición de información de campo–, los sistemas de recolección y aplicación de insumos en maquinaria agrícola –monitor de rendimiento, banderillero satelital, aplicación de insumos en tasa variable–, los Sistemas Globales de Navegación Satelital (*Global Navigation Satellite Systems*), el software especializado y los sistemas de gestión de cultivo –entre los que se encuentran los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que consiguen manejar un volumen de datos muy grande y disponen de capacidad de gestión de librerías de mapas, enlaces con bases de datos externas, funciones de análisis de estadísticas, entre otras aplicaciones– (Jiménez, Arteaga & Mesa, 2006).

La teledetección o detección remota se define como la ciencia de adquirir y procesar información de los objetos sin necesidad de entrar en contacto con ellos, gracias a la reflectancia, es decir, la interacción de la energía electromagnética que existe entre el sensor y el objeto estudiado. Los avances en el desarrollo de software y hardware han permitido que equipos aéreos y satelitales puedan adquirir información de la superficie terrestre mediante la medición de la reflectancia de las coberturas (Jiménez, Jiménez & Fagua, 2013), desarrollando conceptos y técnicas de procesamiento que permiten estimar patrones de comportamiento espacial y temporal de variables naturales, útiles para aplicaciones de agricultura de precisión (Abril & Butcher, 2001). El procesamiento de información de campo depende del número y tipo de fuentes de datos, tanto *in situ* como de manera remota, del nivel de detalle del análisis y de la definición de las bandas del espectro electromagnético útiles para la aplicación desarrollada (Sanabria & Archila, 2010).

El fundamento físico de la teledetección es la reflectancia del objeto ubicado a distancia del elemento de sensado. Para muchas aplicaciones de teledetección es fundamental registrar una escena con imágenes multiespectrales, es decir, múltiples imágenes obtenidas en diferentes bandas del espectro electromagnético, adquiridas de diferentes formas, como a través de múltiples cámaras o vidicons (cámaras de vídeo), con los correspondientes filtros para seleccionar la longitud de onda de la radiación electromagnética que se desee. La información procesada por estos sistemas permite identificar y evaluar daños a cosechas, estimar producción y superficies cultivadas, y obtener la humedad del suelo, entre muchas otras aplicaciones (Jiménez, 2010).

Cuando las hojas están enfermas, los pigmentos cafés aparecen debido al decrecimiento de la reflectancia y transmitancia de la hoja en el rango de longitudes de onda entre 400 nm a 750 nm. En la firma espectral de la vegetación (respuesta numérica de varias bandas del espectro electromagnético) se evidencia una baja reflectancia en las bandas azul, verde y roja, y alta reflectancia alrededor de 800 nm (infrarrojo cercano), asociada con la estructura interna de la planta sana y el contenido de agua (Jiménez et al., 2013). La información de las bandas del espectro electromagnético, visible e infrarrojo, puede combinarse algorítmicamente en un índice de vegetación (operaciones específicas entre bandas), para resaltar elementos de discriminación de estado y variedad vegetal en la superficie terrestre (Hoffer, 1978).

La información espectral se adquiere en forma de imágenes de lotes cultivables, las cuales pueden ser obtenidas mediante satélites como: MODIS, QuickBird, Ikonos, Spot, Aster, LandSat, que trabajan esencialmente en las bandas del espectro electromagnético del azul, verde, rojo e infrarrojo cercano, y el sistema RadarSat, que trabaja en las longitudes de onda correspondientes a las microondas (Inoue, 1997), y por otras tecnologías basadas en la adquisición de información en tierra, como espectroradiómetros o sensores de color (Lee & Searcy, 2000). Sin embargo, la información que se puede obtener con imágenes satelitales comerciales corresponde a resoluciones es-

and application of supplies in agricultural machinery (e.g. performance monitoring, satellite guidance, variable application rate), and Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Other tools are specialized in software and crop management systems, e.g., Geographic Information Systems (GIS), which handle a big volume of data and manage map libraries and external databases, among other applications (Jiménez, Arteaga & Mesa, 2006).

Tele-detection or remote sensing is the science of gathering and processing information on objects without having direct contact with them. This is possible due to reflectance, i.e., the interaction of electromagnetic energy between the sensor and the studied object. Advances made in hardware/software development have enabled aerial and satellite equipment to acquire information from objects on the surface by measuring reflectance coverage (Jiménez, Jiménez & Fagua, 2013). In consequence, there is ongoing development of processing concepts and techniques due to these improvements, which allow the estimation of spatial and temporal behavior patterns over natural variables that are useful to PA applications (Abril & Butcher, 2001). In-field information processing depends on the number and type of data sources (both *in situ* and remotely), on the detail level, and on definition of the electromagnetic spectrum suitable for the desired application (Sanabria & Archila, 2010).

The physical basis of tele-detection is object reflectance located at a pre-established distance from the sensing element. For many tele-detection applications, it is essential to record a scene with multispectral images, i.e. multiple images obtained in different bands of the electromagnetic spectrum and acquired in several ways, such as using multiple cameras or vidicons (video cameras), with the corresponding filters to select the wavelength of the desired electromagnetic radiation. Information processed by these systems allows the identification and evaluation of damage to crops, the estimation of crop yield and cultivated surfaces, and the extraction of soil moisture, among other applications (Jiménez, 2010).

When leaves in crops are unhealthy, coffee pigmentation appears due to the reduction of leaf reflectance and transmittance in the 400 to 750 nm wavelength subset. The vegetation spectral sign (the numeric response of several bands from the electromagnetic spectrum) shows low reflectance in the blue, green, and red bands. By contrast, near infrared reflectance (at about 800 nm) is

high and this band is related with the internal structure and water contents of healthy plants (Jiménez et al., 2013). Information from these bands, either visible or infrared, can be combined with algorithmic procedures to obtain vegetation indices (specific operations between bands), in order to emphasize state discrimination elements and vegetal variety on the surface (Hoffer, 1978).

Acquisition of spectral information is in the form of images of cultivable plots, and satellites like MODIS, QuickBird, Ikonos, Spot, Aster, and LandSat help in this task. These satellites work essentially in the blue, green, red, and near infrared bands. Other useful systems are the RadarSat system, which operates in the wavelengths corresponding to microwaves (Inoue, 1997), and other technologies based on information gathering on the ground, i.e. with spectroradiometers or color sensors (Lee & Searcy, 2000). However, images obtained from these commercial satellite systems usually have either low spatial resolutions where a pixel represents a broad area (Schale, Keller, & Fischer, 2000), or big spatial resolutions with a pixel size less than a meter, but whose cost is prohibitive. These factors have made small plots very difficult to sense and increase the difficulty of analysis in cloudy conditions.

In the 21st century, the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for remote sensing platforms has increased due to GNSS benefits (Nebiker, Annena, Scherrerb, & Oeschc, 2008) and the ease of acquiring economic digital cameras with appropriate features to do so (Zhou, Ambrosia, Gasiewski, & Bland, 2009). The use of micro-UAV as one or multi-propeller helicopters in several research projects allows the gathering of useful data for remote sensing applications (Turner, Lucieer, & Wallace, 2013).

The spatial and temporal resolutions of images obtained from UAV are superior to those obtained from satellite and conventional aerial systems. Besides, these images provide spatial resolution of up to a centimeter per pixel (Hunt, Hively, Fujikawa, Linden, Daughtry, & McCarty, 2010). It is important to note that in 2013, in Japanese agricultural regions, the number of UAV used for supplies application surpassed 2400 units and the number of licensed operators was 14000. This means that UAV are powerful tools, working as hyperspectral remote sensing platforms (Uto, Seki, Saito, & Kosugi, 2013).

In this document, we present the design and development of a multispectral information acquisition system with the goal of analyzing vegetal coverage, initially in

paciales muy pequeñas, en donde un píxel cubre un área muy extensa (Schale, Keller, & Fischer, 2000) o resoluciones espaciales grandes, con tamaños de píxel hasta de menos de un metro, pero con un costo elevado. Estas consideraciones hacen que los lotes pequeños sean difíciles de sensar, además de la dificultad de análisis cuando se adquieren imágenes en condiciones de nubosidad.

En el siglo XXI se ha aumentado el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) para plataformas de sensado remoto, debido a las bondades de los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) (Nebiker, Annena, Scherrerb, & Oeschc, 2008) y a la viabilidad de adquirir cámaras digitales económicas con características apropiadas para tal propósito (Zhou, Ambrosia, Gasiewski, & Bland, 2009). El uso de micro-VANT, tales como helicópteros de una o múltiples hélices, en diversas investigaciones, permite adquirir datos útiles para aplicaciones de sensores remotos (Turner, Lucieer, & Wallace, 2013).

Las resoluciones espaciales y temporales de las imágenes adquiridas por los VANT son superiores a las que se obtienen por satélite y sistemas convencionales aéreos, además de proveer resolución espacial del orden de un centímetro por píxel (Hunt, Hively, Fujikawa, Linden, Daughtry, & McCarty, 2010). Es importante recalcar que en 2013, en los campos agrícolas japoneses, el número de VANT para aplicación de insumos superó los 2.400 y el número de operadores con licencia era de 14.000. Esto hace de los VANT herramientas poderosas como plataformas de sensores remotos hiperespectrales (Uto, Seki, Saito, & Kosugi, 2013).

En este documento se describe el diseño y desarrollo de un sistema de adquisición de información multiespectral con el objetivo de analizar coberturas vegetales, inicialmente en plantaciones de palma de aceite. Este módulo de adquisición de información en campo se acopla a un VANT, permitiendo su maniobrabilidad en latitud y longitud, para de esta manera mejorar la eficiencia en la adquisición de datos espectrales en lotes pequeños, aumentando la resolución espacial y temporal con un sistema controlado desde tierra.

## II. Método

El objetivo de la investigación fue el diseño e implementación de un sistema multiespectral que se incorpora a un VANT para obtener imágenes correspondientes a longitudes de onda del azul (420-500nm), el verde (520 - 600nm), el rojo (620-750 nm) y el infrarrojo cercano (750-900 nm). Además se desarrolló una aplicación en software con interfaz gráfica de usuario (*Graphic User Interface*, GUI) que permite importar la información recopilada por la cámara digital en cada longitud de onda y determinar el índice de vegetación (*Normalized Differential Vegetation Index*, NDVI).

Los requerimientos de diseño para la adecuación del dispositivo a una plataforma aérea no tripulada establecían que el sistema debía ser: compacto, liviano y controlado por un sistema embebido, para su fácil transporte, uso y bajo costo de de-

sarrollo. La necesidad de capturar información de imagen en el visible e infrarrojo implicó el uso de dos sensores de imagen distintos, de manera simultánea. Se eligieron los sensores de imagen LinkSprite™ JPEG Color Camera TTL Interface, que además de cumplir con el requerimiento de captura de imagen en el espectro infrarrojo cercano, cuentan con una interfaz serial para su control, que permite su fácil utilización con un microcontrolador.

### III. Implementación

#### A. Cámara multispectral

Una de las cámaras LinkSprite™ se modificó físicamente para que no captara luz infrarroja. Esta modificación implicó añadir un filtro de bloqueo de luz infrarroja en el sistema de lentes de la cámara (**FIGURA 1**), de tal manera que al sensor no llegara luz de longitud de onda superior a 700nm, con lo cual se logró que funcionara como una cámara digital sensible solamente a luz en el espectro visible.

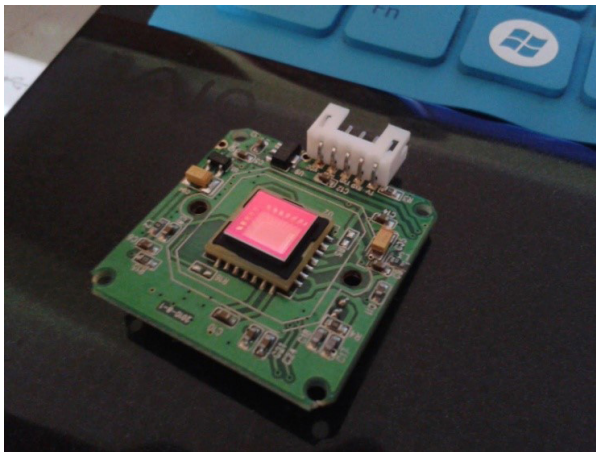


Figure 1. Detail of the installed filter (without lens system) /  
Figura 1. Detalle del filtro infrarrojo instalado (sin sistema de lentes)

Después de colocar el filtro de bloqueo de luz infrarroja a una de las cámaras, se tomaron imágenes comparativas para verificación. La **FIGURA 2** muestra las diferencias de las imágenes con y sin el filtro de bloqueo de luz infrarroja. Se puede observar con claridad la variación en los contrastes, lo que evidencia que la imagen es capturada de manera adecuada en el espectro de luz visible en la cámara modificada (a) y la otra aún es sensible a la luz infrarroja (b).

Debido a la aplicación del proyecto fue necesario que los dos sensores (cámaras) se encontraran ubicados lo más cerca posible y que la estructura que los soporta fuera muy liviana; para tal fin, la estructura de soporte fue fabricada en una impresora 3D RepRap Prusa Mendel. La impresora requería que los modelos del diseño se encontraran en archivos con formato *.stl*, por lo cual se usó para su modelamiento la versión *freeware* del software SketchUp, teniendo en cuenta las dimensiones de los sensores para hacerla lo más liviana y compacta posible. En la **FIGURA 3** se visualizan los diseños de la estructura, en la **FIGURA 4** el diseño impreso y los sensores ubicados en ella.

African oil palm (*Elaeis guineensis*). This in-field information acquisition module perfectly couples with a UAV, allowing its maneuverability in both latitude and longitude. This is in order to increase the efficiency of data gathering in small plots, subsequently increasing the spectral and temporal resolution with a surface-controlled system.

### II. Method

The objective of this research project was the design and implementation of a multispectral system embedded in a UAV to obtain images corresponding to the blue (420–500 nm), green (520–600 nm), red (620–750 nm), and near infrared (750–900 nm) wavelengths. Furthermore, we developed an application with a Graphical User Interface (GUI) that allows the collected information to be imported from the digital camera in every wavelength and the *Normalized Differential Vegetation Index* (NDVI) to be determined.

The design requirements for adaptation of the device into a UAV were that the system must be compact, light, and controlled by an embedded system (for ease of transportation and low cost). The need to capture information in the visible and infrared bands implies the use of two different image sensors simultaneously. We chose LinkSprite® JPEG Color Camera TTL Interface sensors because they not only fulfill the requirement of infrared capture, but also have a serial interface for their control, which allows the use of microcontrollers.

### III. Implementation

#### A. Multispectral camera

One of the LinkSprite® cameras was physically modified, so that it could not capture infrared light. This modification consisted in the addition of an infrared light block filter; this filter is located in the camera lens (see **FIGURE 1**) so it blocks light with a wavelength above 700 nm, producing a digital camera that is sensitive only to visible light.

After this infrared filter was set, we carried out some tests to verify its correct operation. **FIGURE 2** shows differences in images with and without the use of the filter. It is easy to observe the variation in the image contrasts, i.e., the capture of the images is correct in the visible light spectrum with the modified camera (a), whilst the other camera is still sensitive to infrared light (b).



Figure 2. Comparison of image acquisition with and without blocking filter. a) Image with infrared filter. b) Image without infrared filter /  
 Figura 2. Comparativo de adquisición de imagen con y sin filtro de bloqueo. a) Imagen adquirida con filtro de bloqueo de luz infrarroja. b) Imagen adquirida sin filtro de bloqueo de luz infrarroja

Because of project requirements, it was necessary for the two sensors (cameras) to be located as closely as possible and their supporting structure to be as light as possible. Therefore, this support structure was made in a RepRap Prusa Mendel 3D printer. This device requires design models contained in “.stl” extension files; hence, for modeling we used the free version of SketchUp software, considering the dimensions of the sensors to model the structure to be as light and compact as possible. **FIGURE 3** shows the structure design and **FIGURE 4** displays the printed design and sensors located on it.

**B. Primer prototipo - Sistema de control, adquisición y almacenamiento de información - Microcontrolador TM4C-123GH6PM**

El sistema implementado en la primera etapa consistió en el uso del kit de evaluación Tiva™ C Series LaunchPad de Texas Instruments, que consiste en una plataforma de desarrollo del microcontrolador TM4C123GH6PM, el cual posee un núcleo procesador de 32-bit ARM® Cortex™-M4 a 80 MHz, 8 periféricos UART, 32 Kb de RAM, entre otras características. Para el almacenamiento de la información de imagen en un dispositivo externo se utilizó un módulo serial µDrive™ y para la aplicación en software se utilizó el lenguaje de programación Python (**FIGURA 5**).

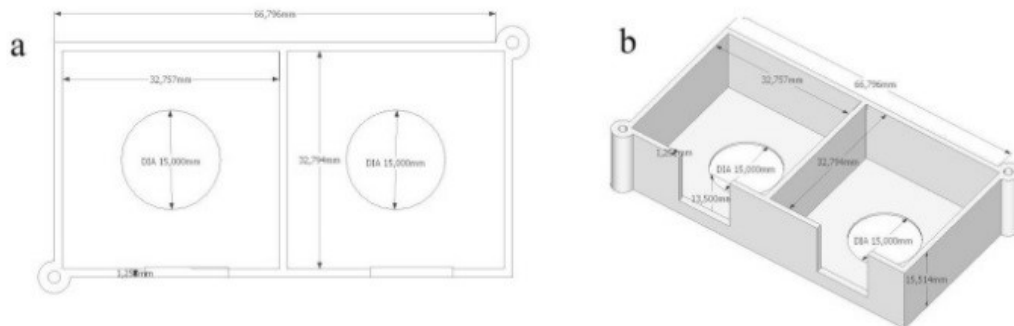


Figure 3. Design of multispectral system structure / Figura 3. Diseño de la estructura del sistema multispectral

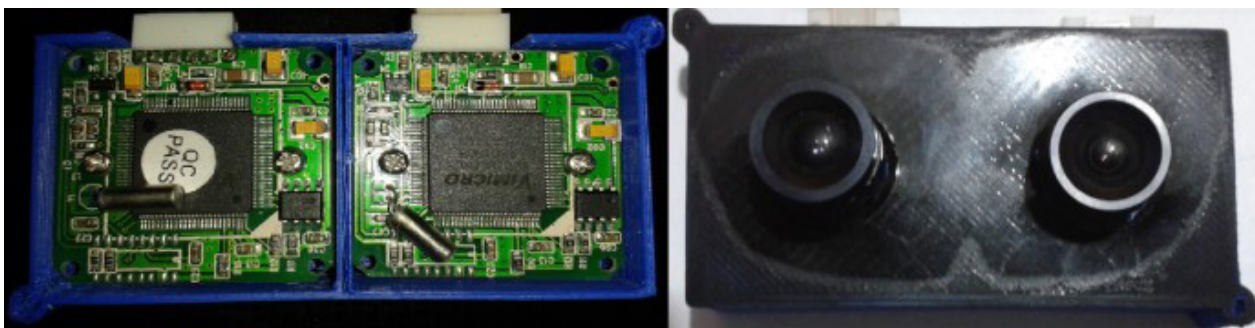


Figure 4. Printed cameras support / Figura 4. Soporte de las cámaras impreso

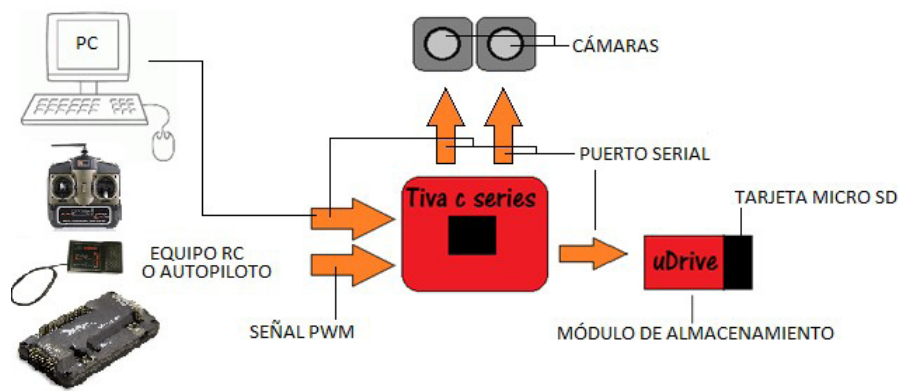


Figure 5. System description in initial stage. Source: Authors / Figura 5. Descripción del sistema en la etapa inicial. Fuente: Autores

El funcionamiento del sistema consiste en el envío de comandos al controlador principal para realizar el proceso de captura y almacenamiento de fotografías. Esto se realizó mediante comandos enviados por uno de los puertos seriales de la tarjeta y opcionalmente mediante una señal externa enviada a través de un sistema de radiocontrol o el autopiloto del VANT, permitiendo el accionamiento remoto y programado. La tarjeta principal se encarga de aceptar estos comandos y enviar la orden de captura a las cámaras y, posterior a esto, de adquirir los datos de imagen y transmitirlos al módulo de almacenamiento, el cual maneja un sistema de archivos compatible con Windows (FAT) y guarda la imagen para su posterior transferencia a un ordenador, para efectos de procesamiento.



Figure 6. Capture algorithm flow diagram / Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo de captura

### B. First prototype - Control, acquisition, and storage information system - TM4C123GH6PM microcontroller

The system implemented in the first stage used the Tiva® C Series LaunchPad evaluation kit made by Texas Instruments®, which consists of a development platform of the TM4C123GH6PM microcontroller. Features of this device include one 32-bit ARM® Cortex®-M4 processing core

clocked at 80 MHz, 8 UART peripherals, and 32 KB of RAM, among others. For image storage information, we used the  $\mu$ Drive® serial module and we built the software application over Python programming language (FIGURE 5).

The base of the system operation is commands sent to the main microcontroller to capture and record frames (photographs). This was possible via instructions transmitted by one of the card serial ports and, optionally, via an external signal emitted through the UAV's radio control or autopilot, allowing remote and programmed functioning. The main card accepts these commands and it sends the *capture* order to the cameras. Afterwards, this card sends the *acquire* order and the cameras transmit the captured image to the storage module; this module operates with a File Allocation Table (FAT) file system architecture (compatible with Windows®) for its subsequent processing on a computer.

Control of both the LinkSprite® cameras and the storage module is by their serial ports, using commands that define actions to execute; for every command sent, the camera generates useful responses to verify if this command has been recognized. Likewise, the  $\mu$ Drive® storage module requires similar handling. The microcontroller employed in the system development controls these devices, successfully pursuing the capture of the crop images (FIGURA 6).

We present the main commands and a brief description in the following paragraphs:

- *Reset*: initializes the camera.
- *Tomar foto*: captures the image present on the sensor; it also compresses and encodes it in “*jpg*” format. Subsequently, it transfers the image to RAM me-

memory, saving it until another picture is taken, or until a *reset* command appears.

- *Leer tamaño*: this command is for file size acquisition. Return values generated by the camera correspond to the binary values called Most Significant Bit (MSB) and Least Significant Bit (LSB) respectively. This is used to prepare the hardware or software before receiving the files.
- *Leer archivo .jpg*: necessary for transmission of files from camera to host. In this command, the values of the initial memory direction, number of required bytes, and delay time between the command recognition sequence and body file are specified. The syntax of this command allows file reception in configurable sizes, i.e., it is possible to receive the entire file in one transmission or receive it in several transmissions. This provides ease of use in the case of limited hardware resources.
- *Detener retención de foto*: this command appears when a new picture is taken. Invocation of this command entails RAM memory liberation.

The previous commands are those required by the developed application. There are other commands that match various additional camera settings, e.g. compression rate, image size, energy saving mode, serial port speed, etc. We do not modify these parameters because the optimal configuration of the cameras is factory predefined. As the final application requires two images –corresponding to the visible and infrared spectrum respectively–, capture must be simultaneous to generate pictures suitable to calculate the NDVI and other vegetation indices. Control of both cameras (with and without infrared filter) is through a control card (FIGURE 7) using *Energia* free software. The card sends initialization, capture, and frames transmission commands through two of the available UART ports, one for each camera.

For storage of the obtained information, the images are compressed and stored in RAM of every camera in *.jpg* format. This allows saving of space and ease of reading. On the other hand, the  $\mu$ Drive® storage module (FIGURE 8) consists of a serial interface, through the microcontroller sending instructions and files for storage in a microSD® card. The manufacturer stipulates the command set to file creation and file storage protocol; this protocol consists of sending limited longitude information packages after sending the file name and bytes amount. Since the maximum data size per transfer in

Tanto las cámaras LinkSprite™ como el módulo de almacenamiento se deben controlar a través de su puerto serial utilizando comandos que definen la acción a realizar; por cada comando enviado, la cámara genera una respuesta útil a la hora de verificar si el comando ha sido reconocido. De igual manera el módulo de almacenamiento  $\mu$ Drive™ requiere un manejo similar. El microcontrolador utilizado realiza un control de estos dispositivos para realizar la captura de las imágenes (FIGURA 6).

La descripción de cada comando se esboza a continuación:

- *Reset*: inicializa la cámara.
- *Tomar foto*: captura la imagen presente en el sensor, la comprime y codifica en formato *.jpg* y luego transfiere el archivo a una memoria RAM, manteniéndolo hasta el momento de la toma de otra foto o hasta un *reset*.
- *Leer tamaño*: se envía para adquirir el tamaño del archivo de imagen generado, los valores de retorno enviados por la cámara corresponden al valor en binario MSB y LSB, respectivamente; es útil para realizar una preparación del hardware o software host antes de recibir el archivo.
- *Leer archivo .jpg*: se envía para que la cámara transmita el archivo al *host*. En el comando se especifican los valores de dirección de memoria de inicio en la cual comenzará la transmisión, además del número de bytes requeridos por el host para ser transmitidos por la cámara y un tiempo de retardo entre la secuencia de reconocimiento de comando y el cuerpo del archivo. La sintaxis de este comando permite la recepción del archivo en tamaños configurables, es decir, es posible recibir todo el archivo en una sola transmisión o por partes; de esta manera se facilita la transmisión de los datos en hardware de recursos limitados.
- *Detener retención de foto*: se envía cuando se desea volver a tomar una imagen; hace que la memoria RAM dedicada al almacenamiento de la foto tomada anteriormente quede libre para una nueva captura.

Los anteriores comandos son los requeridos por la aplicación desarrollada; otros comandos corresponden a la configuración

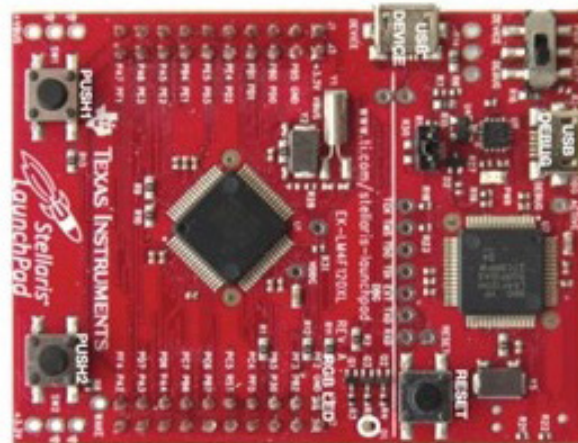


Figure 7. Tiva® StellarPad control card with LM4F120H5QR/  
Figura 7. Tarjeta de control Tiva StellarPad con LM4F120H5QR



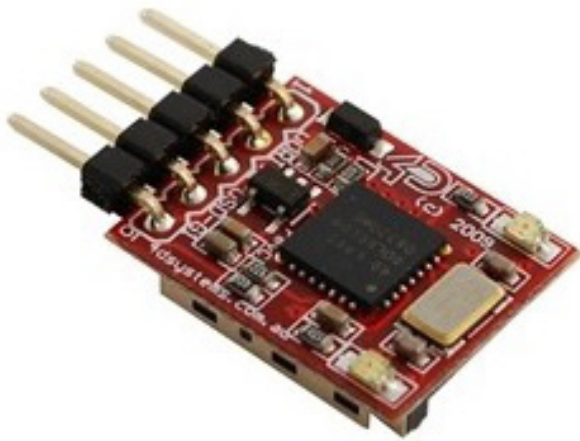


Figure 8.  $\mu$ Drive<sup>®</sup> module (used for information storage in the microSD<sup>®</sup> card) / Figura 8. Módulo  $\mu$ Drive<sup>™</sup> (módulo para almacenamiento de la información en la tarjeta SD)

de parámetros adicionales de la cámara, tales como: tasa de compresión, tamaño de imagen, modo de ahorro de energía, cambio de velocidad de puerto serial. Estos parámetros no se modifican, pues la configuración óptima de la cámara ya está definida de fábrica. Como la aplicación final requiere la obtención de una imagen correspondiente al espectro electromagnético visible y otra al infrarrojo cercano para su aplicación en la generación de imágenes NDVI y otros índices de vegetación, se requiere que la captura de las imágenes se realice de manera simultánea, antes de ser almacenadas. Para controlar ambas cámaras se programó la tarjeta de control (FIGURA 7) utilizando el software libre Energia; la tarjeta envía los comandos de inicialización, captura y transferencia de fotogramas a través de dos de los puertos UART disponibles, uno para cada cámara.

Para el almacenamiento de la información obtenida, las imágenes se comprimen y son almacenadas en la RAM de cada cámara con formato *.jpg*, lo que permite que los fotogramas no ocupen mucho espacio de almacenamiento y facilita su lectura. El módulo de almacenamiento  $\mu$ Drive<sup>™</sup> (Figura 8) consta de una interfaz serial a través de la cual el microcontrolador puede enviar comandos y archivos para su almacenamiento en una tarjeta micro SD. El fabricante especifica el set de comandos para la creación y el protocolo de almacenamiento de archivos, que consiste en el envío de paquetes de información de longitud limitada tras enviar el nombre del archivo y la cantidad de bytes. Dado que la máxima cantidad de datos por transferencia en el  $\mu$ Drive<sup>™</sup> es de 100 bytes y que el fabricante de las cámaras especifica que la descarga de la información debe realizarse en paquetes de tamaño múltiplo de 8, se eligió 96 bytes como tamaño de paquete adecuado para ambos dispositivos. La transferencia del archivo de imagen se realiza por el microcontrolador mediante la generación de comandos y la redirección de datos entre dispositivos.

La sintaxis de comandos para crear un archivo o añadir información a uno ya existente en el  $\mu$ Drive<sup>™</sup> se describe a continuación:

- 0x40 0x74: tipo de comando;
- 0x80: modo de adición de datos;

the  $\mu$ Drive<sup>®</sup> is 100 bytes and the camera manufacturer recommends that the information download should be in multiples of 8, we chose 96 bytes as a suitable packet size for both devices. The microcontroller, assisted by commands generation and data redirection between devices, carries out the image transfer.

We briefly present the command syntax to create a file or add information to an existing one in the  $\mu$ Drive<sup>®</sup> in the following bullet points:

- 0x40 0x74: command type;
- 0x80: data adding mode;
- nombre\_archivo: file name is sent as an ASCII sequence of characters (string) with extension;
- 0x00: finisher, to indicate the end of “nombre\_archivo”;
- tamaño\_archivo: 4 bytes are sent, including number of received bytes. In this case, the command “0x00 0x00 0x00 0x60” (96) is sent; and
- datos: desired information to store.

The image storage procedure consists in sending –to the cameras– the reading command of the generated file size, in order to decide the number of packets to transfer. Afterwards, the command to create or add data to a file is sent to the  $\mu$ Drive<sup>®</sup> device and the first camera receives the reading command; consequently, the  $\mu$ Drive<sup>®</sup> sends 96 bytes and this data transfer is made directly between this device and the camera.

This procedure continues until the image corresponding to the first camera is completely transferred and stored; then, data transfer continues with the second camera and the image is stored with a different name. The MicroSD<sup>®</sup> card in the storage module must be in FAT16 format (to ensure correct image storage). The  $\mu$ Drive<sup>®</sup> module has two light-emitting diodes (LED) that represent its energy and information transfer operation state, respectively. This last LED is intermittent when the  $\mu$ Drive<sup>®</sup> is transferring information; once data transmission is over, it turns off.

Once images have been captured, the storage device is extracted and connected to a computer for its observation and processing. Due to the low speed of data transfer over the cameras and storage system (90 seconds to acquire and store images from the two cameras), together with the sequential features of the procedure, we realized that it would be better to change the microcontroller for another with greater speed and versatility.

### C. Second prototype- control, acquisition, and storage information system. Raspberry Pi model B

For this second prototype, we use the reduced board computer *Raspberry Pi* model B (from now, we abbreviate its name to *Raspberry* only), which is based on a System on a Chip (SOC) Broadcom with one ARM®11 core clocked at 700 MHz, 512 MB of RAM, and a Secure Digital® (SD) card as data storage unit. Other features of this board are one Ethernet port, one HDMI port, and two USB ports. The physical size of the card (85.6 mm x 56.5 mm), its low weight (45 g), and superior computational power make this board ideal to replace the previous Tiva® card we used in the first prototype; *Raspberry Pi* also adds other functionalities to the system. **FIGURE 9** shows the schematic of this prototype.

Operation of the system consists of commands sent to the controller of the *Raspberry* card from a web interface and/or through signals sent from the autopilot either manually or automatically. We programmed the *Raspberry* card in order to control the camera functions –initialization, configuration, and capture. A local web server receives images from the cameras in order to facilitate their visualization and management from external systems. **FIGURE 10** shows the basic scheme of the software architecture.

The web interface allows capture process initialization, visualization of the image files and their management. It also enables image packaging in a compressed file and remote system testing from a web browser (see **FIGURE 11**). The *Raspberry* automatically connects to a wireless access point compatible with the IEEE 802.11b/g/n set of standards; so, the user should enter the IP direction of the *Raspberry* to gain access to the remote system-testing interface.



Figure 9. Schematic of control, acquisition, and information storage system. *Raspberry Pi* model B / Figura 9. Esquema del sistema de Control, Adquisición y almacenamiento de información. *Raspberry PI* modelo B

- nombre\_archivo: se envía el nombre del archivo como una cadena de caracteres ASCII con extensión;
- 0x00: terminador, para indicar fin de nombre\_archivo;
- tamaño\_archivo: se envían 4 bytes conteniendo el número de bytes a recibir; en este caso, se envía 0x00 0x00 0x00 0x60 (96); y
- datos: información a guardar.

El procedimiento de almacenamiento de las imágenes consiste en enviar –a las cámaras– el comando de lectura de tamaño de archivo generado para determinar el número de paquetes que se deben transferir; luego se envía al  $\mu$ Drive™ el comando de crear o añadir datos a un archivo y se envía a la primera cámara el comando de lectura, para que envíe 96 bytes. La transferencia de los datos entregados por la cámara se hace de manera directa al  $\mu$ Drive™.

Este procedimiento se realiza hasta que la imagen correspondiente a la primera cámara sea completamente transferida y guardada; luego se continúa con la transferencia de la imagen proveniente de la segunda cámara, la cual se guarda con un nombre de archivo distinto. La memoria micro SD insertada en el módulo de almacenamiento debe estar en formato FAT 16, previo al almacenamiento de las imágenes. El módulo  $\mu$ Drive™ posee dos LED que indican su estado de alimentación y operación de transferencia de información; este último indicador se enciende de manera intermitente mientras se esté transfiriendo la información, una vez termina el proceso de almacenamiento, se apaga.

Una vez capturadas las imágenes, el dispositivo de almacenamiento se extrae y se conecta a una computadora para su observación y procesamiento. La baja velocidad de transferencia de las cámaras y el sistema de almacenamiento (90 segundos para adquirir y almacenar las imágenes de las dos cámaras), además del carácter secuencial del proceso, llevó a considerar el cambio del controlador por otro que ofreciera mayor velocidad y versatilidad.

### C. Segundo prototipo - Sistema de control, adquisición y almacenamiento de información. *Raspberry PI* modelo B

Se seleccionó la computadora de placa reducida *Raspberry PI* modelo B, basada en un SOC Broadcom con núcleo ARM11 a 700MHz, 512MB de RAM, y una tarjeta SD como unidad de almacenamiento de datos para el sistema operativo y el usuario, además de contar con puertos de entrada y salida de propósito general configurables, puerto Ethernet, puerto HDMI y dos puertos USB. El tamaño físico de la tarjeta (85.60 mm × 56.5 mm), su bajo peso (45g) y superior capacidad computacional, permitieron su utilización como plataforma de desarrollo idónea para reemplazar la tarjeta de desarrollo TIVA de Texas Instruments y añadir funcionalidades al sistema de adquisición de imágenes. El esquema de este sistema se muestra en la **FIGURA 9**.

El funcionamiento del sistema consiste en el envío de comandos al controlador mediante una interfaz web y/o una señal enviada a través del autopiloto de manera automática o manual. La tarjeta Raspberry Pi se programó de tal manera que controlara las funciones de las cámaras –inicialización, configuración y captura–, el almacenamiento de las imágenes y su publicación en un servidor web local, para su fácil adquisición en un sistema externo que permite la visualización y administración de los archivos generados. El esquema básico de la arquitectura del software se muestra en la **FIGURA 10**.

La interfaz web permite la puesta en marcha del proceso de captura, la visualización de archivos de imagen, su administración, empaquetamiento en un archivo comprimido y prueba del sistema mediante el acceso desde un navegador Web (**FIGURA 11**). La Raspberry Pi se conecta automáticamente a un punto de acceso inalámbrico compatible con el estándar IEEE 802.11b/g/n; el usuario se debe conectar con un dispositivo adecuado que cuente con navegador Web a este punto de acceso inalámbrico, y acceder a la dirección IP de la Raspberry Pi y a la interfaz web.

Desde la interfaz Web se pueden activar dos modos de operación del sistema de captura: el primero es el de test o captura manual, que se implementó con el fin de realizar captura de fotogramas para comprobar el estado del sistema y realizar ajustes físicos como enfoque o alineación de cámaras, en donde las imágenes se visualizan en la interfaz web tan pronto son capturadas y guardadas; el segundo, es el de captura mediante comando externo, utilizado en conjunto con el autopiloto Ardupilot Mega del VANT, de tal manera que la Raspberry Pi reciba un pulso generado mediante operación manual (por radiocontrol) o mediante *waypoints* en un plan de vuelo autónomo.

Para acceder a los archivos de imagen desde otro dispositivo que se encontrara en la red inalámbrica a la cual está unida la Raspberry Pi, se implementó un servidor Web (*lighttpd*) capaz de ejecutar código PHP, y se modificó una galería de uso libre para fines no comerciales llamada Single File PHP Gallery 4.5.6, escrita por Kenny Svalgaard; dicho archivo *.php* se aloja en el servidor Web de la Raspberry Pi como página principal y permite ver las imágenes que se encuentran en una carpeta especificada; borrar los archivos; ejecutar comandos mediante la asignación de permisos, probar, iniciar, parar la ejecución del programa; y generar un archivo comprimido; todo desde un navegador Web que puede estar ejecutándose en un dispositivo móvil (celular, tableta u ordenador portátil).

Se recomienda, antes de la utilización del sistema en campo, configurar la red inalámbrica a la cual se conectará; dicha red será normalmente un punto de acceso móvil que puede configurarse en un teléfono móvil, un router inalámbrico o un ordenador portátil. Una vez que la Raspberry Pi se conecta a una fuente de alimentación, el sistema operativo arranca, se inicia el servidor web y se conecta a la red inalámbrica confi-

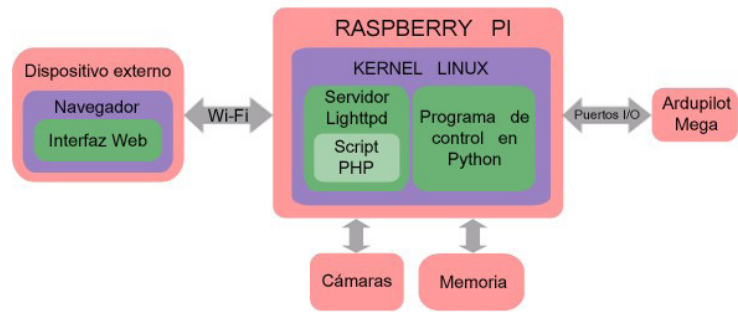


Figure 10: Basic scheme of software architecture / Figura 10: Esquema básico de la arquitectura del software

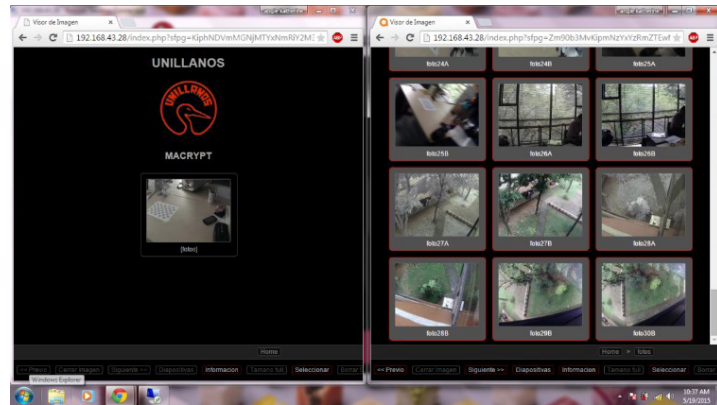


Figure 11: Web interface / Figura 11: Interfaz web

From this web interface, the user can activate two operation modes for the capture system. The first is the *test* or *manual capture* mode, which was implemented in order to capture frames to check the system state and to make physical adjustments like lens focus or camera alignment. Besides, in this mode, visualization of images in the web interface is almost immediately after the camera shot. The second operation mode is related with capture through external command and its use is in parallel with the autopilot function of the UAV. In other words, the Raspberry receives a pulse generated from manual operation (by radio control) or from waypoints in autonomous flight plans.

To gain access to image files from another device connected to the same wireless network as the Raspberry, we implemented a web server (*lighttpd*) capable of executing PHP code, and we modified a non-commercial gallery called Single File PHP Gallery 4.5.6, written by Kenny Svalgaard. This *.php* file is allocated in the Raspberry web server as the main page and it allows the user to visualize images in specific folders, erase the files, execute commands through permission assignments, to try, initialize, and stop program execution, and create compressed files.

All of this is directly from web browsers and is suitable to execute in mobile devices (smartphones, tablets, etc.).

We recommend, before using the system in the field, setting up the wireless network to use. Typically, this network is a mobile hotspot in mobile devices, a wireless router or a computer. Once the Raspberry is plugged into an energy source, the operating system starts. Subsequently, the web server starts and it automatically connects to the wireless network. After a few seconds, the system is ready to operate. For this prototype, we use the 3D printed structure and we couple it into a shell that contains a control card and its transmission peripherals, along with the cameras, always keeping the lowest possible total weight of the system for adequate incorporation into the aerial platform (see **FIGURE 12**).

#### D. Remote image storage

In order to give commands to capture images remotely, it is necessary to use a wireless communication system. For this purpose, we use a generic aeromodeling radio control system. This system consists of a transmitter (**FIGURE 13**) whose wireless signal propagates at 2.4 GHz and a receiver (**FIGURE 14**) that receives this signal and delivers a Pulse Width Modulation (PWM) signal for each channel. Subsequently, the PWM signal of one channel enters the development card and is decoded. In order to achieve that, the capture process is carried out in a specific position of the remote control.

#### E. Correction of geometric distortion

The images obtained from the sensors present geometric distortion, mainly caused by optical features of the lens system. The cause of this phenomenon is the absence of orthogonal projection over the images. With the

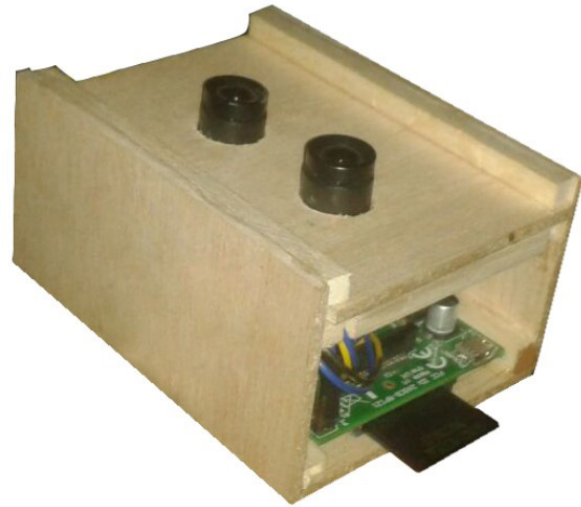


Figure 12. Final structure in multispectral camera / Figura 12. Estructura final cámara multispectral

gurada de manera automática. Tras unos segundos el sistema está listo para su operación. Para este prototipo se incorporó la estructura impresa en 3D a un armazón que integra la tarjeta de control y sus diversos dispositivos periféricos de transmisión con las cámaras, pero buscando que el sistema se mantuviera lo más liviano posible para su óptima incorporación en la plataforma aérea (**FIGURA 12**).

#### D. Captura de las imágenes a control remoto

Para dar la orden de captura de las imágenes a distancia es necesario usar un sistema inalámbrico de comunicación. Para este propósito se utilizó un sistema de radio control genérico de aeromodelismo, el cual consiste en un emisor (**FIGURA 13**), cuya señal inalámbrica se propaga a una frecuencia de 2,4 GHz, y un receptor (**FIGURA 14**), que recibe esta señal y entrega una señal PWM por cada canal. La señal PWM de uno de los canales entra a la tarjeta de desarrollo y es decodificada, de tal manera que en una posición específica de uno de los mandos del control se realice el proceso de captura.



Figure 13. Transmitter of image capture activation system / Figura 13. Transmisor del sistema de activación de captura de imágenes



Figure 14. Receiver of image capture activation system / Figura 14. Receptor del sistema de activación de captura de imágenes

### E. Corrección de la distorsión geométrica

Las imágenes obtenidas por los sensores presentan una distorsión geométrica causada por las características ópticas del sistema de lentes, que las hace inadecuadas para su uso en agricultura de precisión, por no tratarse de imágenes con proyección ortogonal. Para poder desarrollar el algoritmo de georreferenciación adecuado es necesario realizar una rectificación geométrica de las imágenes obtenidas. Se comprobó el tipo de distorsión mediante el uso de una plantilla consistente en una cuadrícula impresa en papel. Como se puede observar en la **FIGURA 15**, la escena capturada presenta una distorsión de barril, causando que las líneas de la cuadrícula sean representadas como líneas con incremento de curvatura proporcional a la distancia del eje central de la imagen.

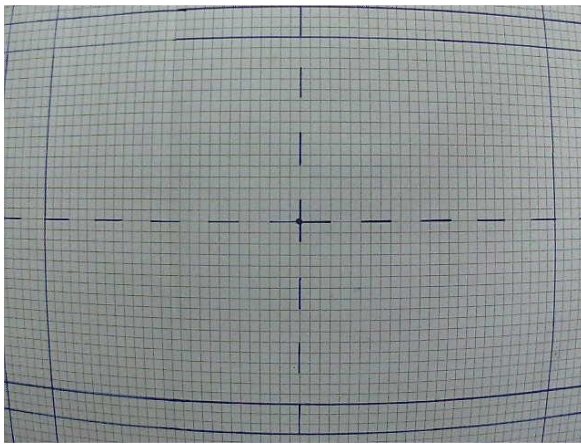


Figure 15. Sensor-acquired image, presenting a barrel distortion /  
Figura 15. Imagen adquirida por los sensores, presenta distorsión de barril

Para realizar la ortorectificación de la imagen se usó el software MATLAB™ R2014a junto con el Toolbox Camera Calibrator que facilitan crear una imagen corregida mediante el modelamiento de la distorsión de lente. El procedimiento de calibración y obtención de coeficientes de distorsión radial consiste en la captura de un conjunto de imágenes de un patrón de ajedrez desde distintos ángulos y distancias con la cámara; luego se realiza un procesamiento basado en el mapeo de la posición espacial de la cámara respecto del patrón, proceso que da como resultado un conjunto de parámetros intrínsecos, extrínsecos y de distorsión de lente.

Los parámetros de localización distorsionada radial de los píxeles de las imágenes capturadas por las cámaras se denotan mediante las fórmulas (1) y (2):

$$x_{\text{distorsionado}} = x(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4) \quad (1)$$

$$y_{\text{distorsionado}} = y(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4) \quad (2)$$

donde:

$x$  y  $y$  son las localizaciones sin distorsión de los píxeles,

$k_1$  y  $k_2$  son los coeficientes de distorsión, y

$$r^2 = y^2 + x^2.$$

aim of developing adequate georeferenced algorithms, it is necessary to make geometric rectifications of the images taken. We checked the distortion type by the use of a consistent template over a squared grid on paper. As the reader can see in **FIGURE 15**, the captured scene presents a *barrel distortion*, causing the representation of grid lines as lines with increased proportional curvature relative to the distance from the image's central axis.

With the purpose of carrying out image orthorectification, we use MATLAB® R2014a software together with *Camera Calibrator* toolbox, which provide corrected images by modeling lens distortion. The procedure to calibrate and obtain the radial distortion coefficients consists of capturing image sets of a chessboard-like pattern from several angles and distances. Afterwards, the foundation of the image processing is mapping of the camera's spatial position relative to the pattern; this creates a set of intrinsic, extrinsic, and lens distortion parameters.

Equations (1) and (2) describe the parameters of the radially distorted location in images pixels, for X and Y coordinates, respectively:

$$x_{\text{distorted}} = x(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4) \quad (1)$$

$$y_{\text{distorted}} = y(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4) \quad (2)$$

where:

$x$  and  $y$  are the locations without distortion of pixels,

$k_1$  and  $k_2$  are distortion coefficients, and the following formulation is true

$$r^2 = y^2 + x^2$$

Moreover, the  $k_1$  and  $k_2$  coefficients of the color camera are -0.4220 and 0.2277, respectively; whilst the coefficients of the infrared camera are -0.4413 and 0.3109. The difference between cameras is due to the optical effect produced by the infrared blocking filter added previously.

Using these coefficients, we made corrections to the distorted images, solving from (1) and (2) the position of pixels without distortion, and obtaining images closer to an orthogonal projection, as **FIGURE 16** shows. This image correction allows an adequate record of captured images from both cameras, matching pixel by pixel to compute the vegetation indices.

## IV. Results

The information acquisition system consists of a UAV with a GPS position module, autopilot system, controller,

and payload –the multispectral camera– (see **FIGURE 17**). On the surface, there is a control station conformed by a telemetry system, image attainment system, and radio control, as **FIGURE 18** exhibits. Similarly, **FIGURE 19** shows the system GUI, which permits manipulation of the images obtained by the multispectral system. We called this the PIND or Precision Index Normalized Distribution and it evaluates the NDVI for single plants (African oil plant in this case study). In **FIGURE 20**, we show the images captured by the designed device, i.e. the visible spectrum image and near infrared image; these images present the terrestrial coverage behavior and allow the capture of the blue, green, red, and near infrared spectral bands (**FIGURE 21**).

Estimation of the NDVI vegetation index is executed by the PIND application, which takes an image corresponding to the red color (in the visible spectrum band) and an image in gray scale (achieved by the infrared camera); then it matches pixel by pixel and applies (3), which is the definition of this vegetation index:

$$NDVI = \frac{(NearIR-Red)}{(NearIR+Red)} \quad (3)$$



Figure 17. Detail of cameras location in the UAV / Figura 17. Detalle de la ubicación de las cámaras en el vehículo aéreo utilizado

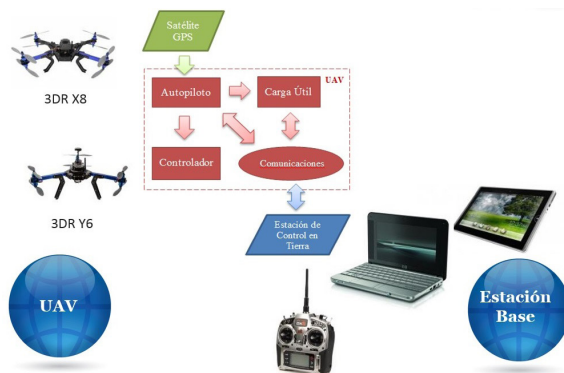


Figure 18. Multispectral information retrieval system / Figura 18. Sistema de adquisición de información multispectral

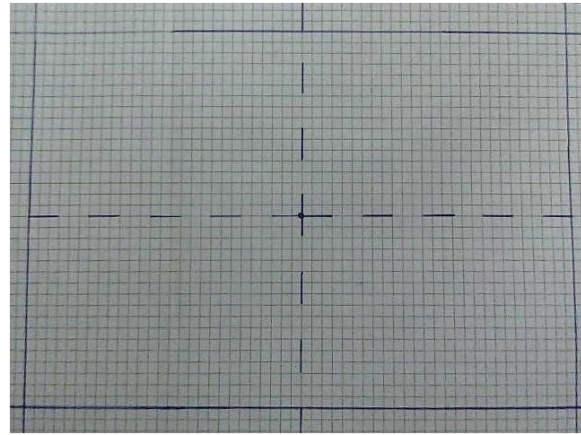


Figure 16. Orthorectified image / Figura 16. Imagen ortorectificada

Los coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  de la cámara a color son -0,4220 y 0,2277 respectivamente, mientras que los de la cámara infrarroja son -0,4413 y 0,3109. La diferencia entre las cámaras se debe al efecto óptico producido por el filtro de bloqueo de luz infrarroja añadido a la respectiva cámara.

Utilizando estos coeficientes se realiza la corrección de la imagen distorsionada despejando de las ecuaciones (1) y (2) la posición de los píxeles sin distorsión, con lo cual se obtienen imágenes que se acercan más a una proyección ortogonal, como lo muestra la **FIGURA 16**. Esta corrección de imagen permite un adecuado registro de las imágenes capturadas por ambas cámaras, logrando que coincidan pixel a pixel, y así poder calcular índices de vegetación.

#### IV. Resultados

El sistema de Adquisición de información consiste en un vehículo aéreo no tripulado, con un módulo de ubicación por GPS, un sistema autopiloto, un controlador y la carga útil –la cámara multispectral– (**FIGURA 17**).

En tierra está una estación de control que consta de un sistema de telemetría, un sistema de adquisición de imágenes y un radio control, como se aprecia en la **FIGURA 18**. La **FIGURA 19** muestra la GUI del sistema que permite manipular las imágenes adquiridas por el sistema multispectral (PIND Precision Index \_ Estimación

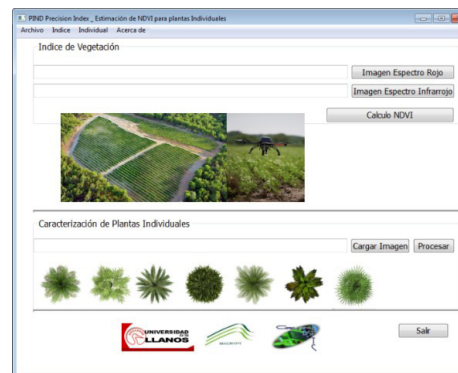


Figure 19. Basic user interface / Figura 19. Interfaz básica de usuario



Figure 20. Images acquired from multispectral system: a) visible spectrum image, b) near infrared image / Figura 20. Imágenes adquiridas por el sistema multiespectral a) imagen RGB del visible, b) imagen del infrarrojo cercano

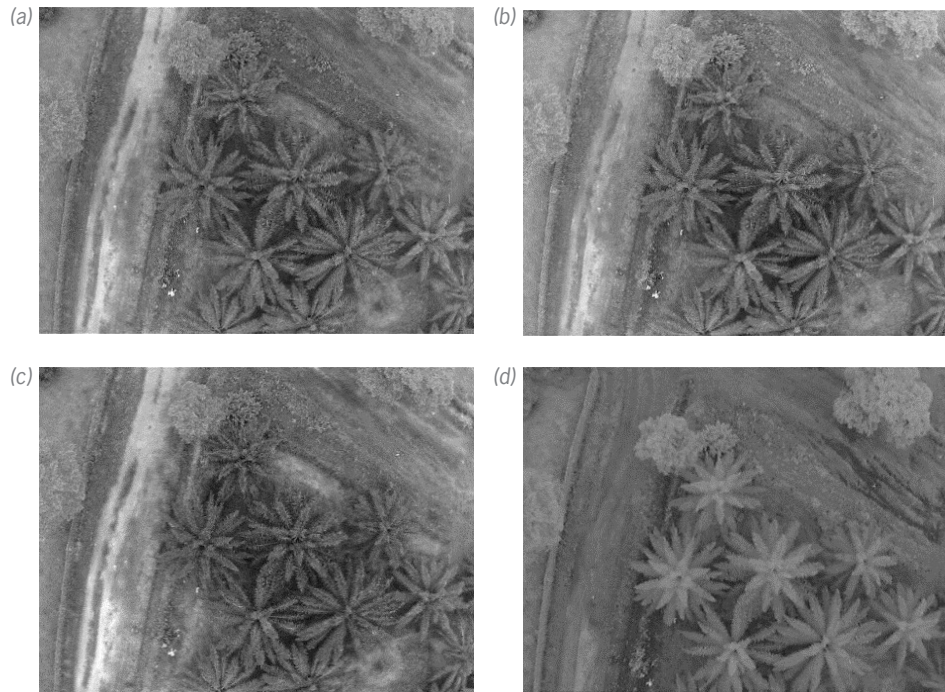


Figure 21. Spectral bands resulting from decomposition of images gathered from multispectral system: a) blue spectral band, b) green spectral band, c) red spectral band and d) near infrared spectral band (NIR) / Figura 21. Bandas espectrales que resultan de la descomposición de las imágenes adquiridas por el sistema multiespectral, a) banda espectral azul, b) banda espectral verde, c) banda espectral roja y d) banda espectral infrarrojo cercano NIR

de NDVI para plantas individuales). En la FIGURA 20 se aprecian las imágenes adquiridas por el dispositivo diseñado, que corresponden a una imagen en el espectro visible y otra en el infrarrojo cercano, que dan cuenta del comportamiento de la cobertura terrestre y permiten la obtención de las bandas espectrales del azul, el verde, el rojo y el infrarrojo cercano (FIGURA 21).

El cálculo del índice de vegetación normalizada NDVI es realizado por la aplicación PIND, la cual toma la imagen correspondiente al color rojo de la cámara en el rango de espectro visible y la imagen en escala de grises obtenida con la cámara infrarroja, haciendo coincidir pixel a pixel ambas imágenes y aplicando la ecuación (3) de este índice de vegetación.

$$NDVI = \frac{(IR_{cercano} - Rojo)}{(IR_{cercano} + Rojo)} \quad (3)$$

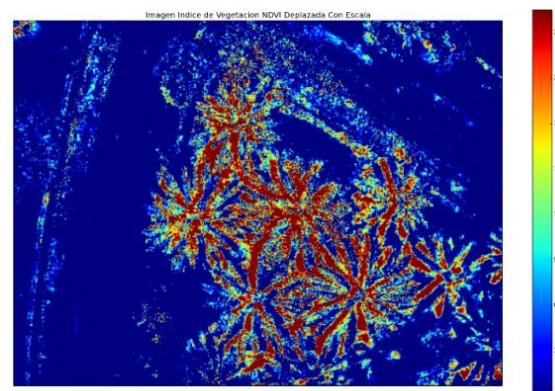


Figure 22. NDVI vegetation index of images from an African oil palm / Figura 22. Índice de Vegetación NDVI de las imágenes adquiridas en una plantación de palma de aceite

where:

*NearIR* are the pixels of the image in the near infrared spectrum, and

*Red* are the pixels from the image captured by the visible spectrum camera.

## V. Conclusions

The system developed over the Tiva® C Series LaunchPad card worked with time and processing limitations (it took up to 90 seconds to obtain one image). We note a considerable improvement by using the Raspberry Pi card (only 5 seconds to capture and store an image). The use of the Raspberry Pi card was favorable to increase the UAV flight time by a few minutes due to its low weight, achieving a greater number of pictures taken by its cameras in less time and increasing the efficiency of the processing time.

The response of the developed multispectral system allowed us to determine the normalized differences vegetation index (NDVI) and observe changes in plants according to the vegetation type, showing that superficial leaves in the studied plants present higher NDVI values. Besides, this index is suitable to establish vegetal health conditions, knowing that healthy plants have elevated infrared levels compared to red levels (i.e. high NDVI) and sick plants have low infrared levels relative to red ones. This is a good indication of the correct functioning of the designed multispectral system.

Advances in research projects carried out by the Universidad de los Llanos, especially in digital signal processing, precision agriculture, and unmanned aerial vehicles operation, have permitted the establishment of spatial behavioral models for phenological variables in the Colombian Orinoquía, and contribute to improvements in the development of the region, by developing proper and adequate tools for its needs.

## Acknowledgments

The authors express sincere gratitude to the General Research Management and the MACRYPT research group and personnel for their support in the development of this research project. This document is supported by the research project “Automatic weed detection and herbicides application using precision agriculture technologies” carried out by the MACRYPT research group and financed by the General Research Management of the Universidad de los Llanos. *sr*

Donde:

*IRcercano*, corresponde a los píxeles de la imagen en el espectro del infrarrojo cercano obtenida por la cámara infrarroja, y

*Rojo*, a los píxeles de la imagen en la banda del rojo obtenida por la cámara en el espectro de luz visible.

Al realizar este procedimiento se obtiene la imagen con el NDVI en escala de grises y valores comprendidos entre -1 y 1. Con el fin de realzar las diferencias entre las distintas coberturas se aplica una paleta de falso color a la imagen (**FIGURA 22**), lo que facilita su interpretación.

## V. Conclusiones

El sistema desarrollado mediante la tarjeta Tiva™ C Series LaunchPad de Texas Instruments funcionó con limitaciones de tiempo de procesamiento (90 segundos en la adquisición de una imagen), lo cual se mejoró al usar la tarjeta RaspBerry Pi (5 segundos en la adquisición de una imagen), aumentó el tiempo de vuelo del VANT, logrando capturar un mayor número de fotografías en menor tiempo, y mejorando las posibilidades de revisarlos y procesarlos de manera más eficiente.

La respuesta del sistema multispectral desarrollado permitió determinar el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) y apreciar sus cambios de acuerdo con el tipo de vegetación, mostrando que las hojas superficiales de la planta presentan valores mayores de índice de vegetación que las malezas en campo, además de permitir establecer condiciones de sanidad vegetal al conocer que una planta sana tiene valores altos de infrarrojo con respecto al rojo (valores altos de NDVI) y que una planta enferma presenta una reducción del valor del infrarrojo, correspondiente al daño que presenta en su estructura (valores bajos de NDVI), lo cual es un indicativo real del correcto funcionamiento del sistema multispectral diseñado.

Los avances en los resultados de las investigaciones que ha realizado la Universidad de los Llanos buscando establecer modelos espaciales del comportamiento de variables fenológicas de las regiones cultivables de la altillanura de la Orinoquía colombiana, mediante el uso del procesamiento digital de imágenes adquiridas por sensores remotos satelitales, de VANT y de campo, útiles en aplicaciones de agricultura de precisión, permiten impactar tecnológicamente en el medio, al desarrollar herramientas propias y adecuadas para la región.

## Agradecimientos

Se agradece a la Dirección General de Investigaciones y al grupo de investigación MACRYPT por su apoyo en el desarrollo de este proyecto de investigación. Este documento surge en el marco del proyecto de investigación “Sistema automático de detección de arvenses y aplicación de herbicida usando tecnologías de agricultura de precisión” desarrollado por el grupo de investigación Macrypt, financiado por la Dirección General de Investigaciones de la Universidad de los Llanos. *sr*



## References / Referencias

- Abril, P., & Butcher, S. (2001). Overgrazing and soil carbon dynamics in the western Chaco of Argentina. *Appl. Soil Ecology*, 16, 243-249.
- Hoffer, A. (1978). Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In *Remote Sensing: The Quantitative Approach* (pp. 227-289). New York, NY: McGrawHill.
- Hunt, E., Hively, W., Fujikawa, W., Linden, S., Daughtry, C., & McCarty, G. (2010). Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*, 2(1), 290-305.
- Inoue, Y. (1997). Remote sensing of crop and vegetative environment. *Journal of Japan Remote Sensing Society*, 17(4), 57-67.
- Jiménez, A. (2010). Dispersión de ondas electromagnéticas en coberturas vegetales. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 10(1), 33-38.
- Jiménez, A., Arteaga, E., & Mesa, R. L. (2006). Sistemas de agricultura de precisión. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 2(1), 44-47.
- Jiménez, A., Jiménez, F., & Fagua, E. (2013). Digital image processing of remote sensing products for precision agriculture. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(21), 19-26.
- Jiménez, A., Ravelo, D., & Gómez, J. (2010). Sistema de adquisición, almacenamiento y análisis de información fenológica para el manejo de plagas y enfermedades de un duraznero mediante tecnologías de agricultura de precisión. *Tecnura*, 14(27), 41-51.
- Lee, W. & Searcy, S. (2000). Multispectral sensor for detecting nitrogen in corn plants. In *ASAE Annual International Meeting, Midwest Express Center, Milwaukee, Wisconsin*, (pp. 9-12) [ASAE No. 001010]. Washington, DC: ASAE.
- Nebiker, S., Annena, A., Scherrerb, A., & Oeschc, D. (2008). A light-weight multispectral sensor for micro UAV—Opportunities for very high resolution airborne remote sensing. *International Arch. Photogrammetry and Remote Sensing Spatial Information*, 37, 1193-1198.
- Sanabria, J. & Archila, J. (2010). Land use discrimination from multispectral images. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(16), 100-107.
- Schale, H., Keller, J., & Fischer, J. (2000). Land cover texture information extraction from remote sensing image data. *CO2 ASPRS Annual Conference*. Bethesda, MD: ASPRS.
- Srinivasan, A. (2001). Site-specific management for selected cropping systems in Asia: Progress and prospects. In *Promoting Global Innovation of Agricultural Science and Technology and Sustainable Agriculture Development Session 6: Information Technology of Agriculture, Proceedings of the International Conference on Agricultural Science and Technology*: Beijing, China, 2001, (pp.180-190). ICAST
- Srinivasan, A. (2006). *Handbook of precision agriculture: Principles and applications*. Binghamton, NY: Food Products.
- Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2013). Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 99, 1-8.
- Uto, K., Seki, H., Saito, G., & Kosugi, Y. (2013). Characterization of rice paddies by a UAV-mounted miniature hyperspectral sensor system. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(2), 851-860.
- Zhou, G., Ambrosia, V., Gasiewski, A., & Bland, G. (2009). Foreword to the special issue on unmanned airborne vehicle (UAV) sensing systems for earth observations. *IEEE Transactions in Geoscience Remote Sensing*, 47(3), 687-689.

## CURRICULUM VITAE

**Andrés Fernando Jiménez López** Master in Sciences–Physics (Universidad Nacional de Colombia) and Electronic Engineer (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia). Professor at the Math and Physics Department - Basic Sciences and Engineering Faculty and member of the Macrypt research group at the Universidad de los Llanos (Villavicencio, Colombia), since 2013. His current research interests include image processing, precision agriculture, physics and remote laboratories. / Máster en Ciencias–Física, de la Universidad Nacional de Colombia, e Ingeniero Electrónico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Desde 2013 es profesor del Departamento de Matemáticas y Física de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, e investigador del grupo Macrypt de la Universidad de los Llanos (Villavicencio-Colombia). Sus áreas de interés en investigación son el procesamiento de imágenes, la agricultura de precisión, la física y los laboratorios remotos.

**Andrés Felipe Gómez Rivera** Candidate to degree in Electronics Engineering (Universidad de los Llanos, Villavicencio-Colombia). His current research interests are applications of precision agriculture, robotics and embedded systems. / Candidato a Ingeniero Electrónico en la Universidad de los Llanos (Villavicencio, Colombia). Sus áreas de interés en investigación son las aplicaciones de agricultura de precisión, la robótica y los sistemas embebidos.

**Angie Katherine Torres Galindo** Candidate to degree in Electronics Engineering (Universidad de los Llanos, Villavicencio-Colombia). His current research interests are applications of precision agriculture, robotics and embedded systems. / Candidata a Ingeniera Electrónica en la Universidad de los Llanos (Villavicencio, Colombia). Sus áreas de interés en investigación son las aplicaciones de agricultura de precisión, la robótica y los sistemas embebidos.