

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA CONTROLABLE DE IMAGEN NDVI ADAPTABLE A UNA PLATAFORMA AÉREA REMOTA.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL

JOSÉ ANTONIO BARREIROS FLORES

jose.barreiros.ec@hotmail.com

NICOLÁS JOSÉ MAGNE TANG

njmt_90@hotmail.com

Director: GEOVANNY DANILO CHÁVEZ GARCÍA

danilo.chavez@epn.edu.ec

Quito, Abril 2015

DECLARACIÓN

Nosotros, José Antonio Barreiros Flores y Nicolás José Magne Tang, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

José Barreiros

Nicolás Magne

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por José Antonio Barreiros Flores y Nicolás José Magne bajo mi supervisión.

Dr. Ing. Danilo Chávez

DIRECTOR

Ing. Eduardo Ávalos, PhD.

CODIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero y profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo y contribuyeron en algún punto de mi carrera universitaria para que la culmine satisfactoriamente.

En primer lugar a mis padres que me acompañan apoyan en este largo camino, por su ejemplo, su fe y su consejo. A mis hermanos por su compañía y por siempre creer en mí.

A Dr. Danilo Chávez por la orientación, el seguimiento y la supervisión del presente trabajo y sobre todo por la motivación y el apoyo recibido.

A Dr. Eduardo Avalos por abrirnos las puertas de su Laboratorio y ante todo por la confianza depositada en mí y en este trabajo.

A Dr. Andrés Rosales por su amistad y ayuda incondicional.

De igual manera quisiera hacer extensiva mi gratitud al Dr. Ángel García y al Dr. Gustavo Scaglia por el interés mostrado y su consejo, clave para la publicación científica de este trabajo.

A Nicolás por su sincera amistad y entrega al presente trabajo.

Un agradecimiento especial a Liz, quien me supo acompañar y apoyar en todos los momentos buenos y malos, por el amor, paciencia y por el ánimo recibido.

José Barreiros

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera sincera a cada una de las personas que me apoyaron a lo largo de esta etapa universitaria en especial:

A mis padres y mis hermanos, por ser mi ejemplo para seguir adelante en el convivir diario y por inculcarme valores que de una u otra forma me han servido en la vida, gracias por eso y por muchos más.

A Dr. Danilo Chávez por la paciencia y la guiar en cada paso de este proyecto.

A Dr. Eduardo Ávalos por la confianza en mis destrezas y habilidades para la realización del proyecto.

A Dr. Andrés Rosales por el apoyo en el proyecto con consejos, contactos y más que todo ser un amigo.

A Gustavo y Ángel por todo su apoyo consejo para incentivar la publicación científica del proyecto.

A José, por la idea del proyecto que nos abrió muchas oportunidades, la amistad y paciencia para la culminación de este proyecto.

A todos mis amigos, cada uno de ellos sabe que estoy infinitamente agradecido, en especial a mis compañeros de la Rama Estudiantil IEEE y mis amigos de la ex REDU.

Nicolás Magne

DEDICATORIA

A mis padres, Yolanda y Rodrigo, ejemplo de que perseverancia, fe y amor; a mi hermano Ángel por su espontaneidad y cariño, a mi hermana Nathalia por su amistad y confianza y a Liz por su incondicional apoyo y amor.

José

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres por el apoyo incondicional en cada momento y su confianza en cada reto que se me presenta; a mis hermanos, que con su ejemplo y palabras de aliento puede seguir adelante con este objetivo.

Nicolás

CONTENIDO

CONTENIDO.....	i
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
PRESENTACIÓN.....	viii
CAPÍTULO 1	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.1.1 GENERAL	1
1.1.2 ESPECÍFICOS	1
1.2 ÍNDICE DE VEGETACIÓN POR DIFERENCIA NORMALIZADA	1
1.2.1 DEFINICIÓN	1
1.2.2 ANTECEDENTES [5] [6].....	1
1.2.3 FORMULA Y FUNDAMENTOS	2
1.2.3.1 <i>Fundamentos</i>	2
1.2.3.2 <i>Formulación [5]</i>	3
1.2.4 INSTRUMENTACIÓN.....	5
1.2.4.1 <i>Instrumentos de uso comercial</i>	5
1.2.5 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN NDVI [21] [22] [23].....	15
1.2.5.1 <i>Métodos de calibración [26]</i>	16
1.2.6 APLICACIONES	16
1.2.6.1 <i>Seguimiento de una sequia [27]</i>	17
1.2.6.2 <i>Seguimiento de cultivos [27]</i>	17
1.2.6.3 <i>Predicción de rendimiento de trigo [28]</i>	19
1.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	20
1.3.1 DEFINICIÓN [29].....	20
1.3.2 ESPECTRO VISIBLE.....	21
1.3.3 ESPECTRO DE INFRARROJO CERCANO	22
1.4 ADQUICISIÓN DIGITAL DE IMAGEN [31] [32].....	22
1.4.1 SENSOR DE IMAGEN DIGITAL CCD/CMOS.....	22
1.4.1.1 <i>Definición</i>	22

1.4.1.2	<i>Funcionamiento</i>	23
1.4.2	FOTOGRAFÍA RGB [32] [33]	23
1.4.2.1	<i>Definición</i>	23
1.4.2.2	<i>Mosaico de Bayer</i>	23
1.4.3	FOTOGRAFÍA MULTIESPECTRAL NRG [34].....	24
1.5	CORRECCIÓN DE IMAGEN	25
1.5.1	DEFINICIÓN	25
1.5.1.1	<i>Fotografía Raw</i>	25
1.5.1.2	<i>Fotografía JPEG</i>	26
1.5.2	BRILLO Y CONTRASTE	26
1.5.3	BALANCE DE BLANCOS [32].....	26
1.5.4	CORRECCIÓN DE GAMMA	28
1.5.5	<i>VIGNETTING</i>	29
1.5.6	CORRECCIÓN POR DISTORSIÓN DE LENTE.....	29
1.5.6.1	<i>Distorsión de Barril</i>	29
1.5.6.2	<i>Distorsión de Cojín</i>	30
1.5.6.3	<i>Distorsión Compleja</i>	30
1.5.6.4	<i>Distorsión de Perspectiva</i>	31
1.6	FILTROS ÓPTICOS	31
1.6.1	DEFINICIÓN	31
1.6.1.1	<i>Transmitancia</i>	32
1.6.1.2	<i>Absorbancia</i>	32
1.6.2	TIPOS DE FILTROS	33
1.6.2.1	<i>Filtro Pasa Banda</i>	33
1.6.2.2	<i>Filtro Pasa Bajo</i>	33
1.6.2.3	<i>Filtro Pasa Alto</i>	33
1.6.2.4	<i>Filtro Neutro</i>	34
1.7	TELEOPERACIÓN	34
1.7.1	DEFINICIÓN	34
1.7.2	ELEMENTOS DE LA TELEOPERACIÓN	34
1.7.2.1	<i>Estabilidad</i>	36
1.7.2.2	<i>Transparencia</i>	37

1.8	SISTEMAS DE ESTABILIZACIÓN Y POSICIONAMIENTO	37
1.8.1	DEFINICIÓN	37
1.8.2	SISTEMAS DE COORDENADAS U ORIENTACIÓN	37
1.8.2.1	<i>Sistema de Coordenadas Inercial Verdadera</i>	37
1.8.2.2	<i>Ángulos de Euler como Componentes de Actitud [39]</i>	38
1.8.3	TIPOS DE SISTEMAS ESTABILIZACION Y POSICIONAMIENTO	39
1.8.3.1	<i>Pan & Tilt</i>	39
1.8.3.2	<i>Sistema de Ejes Flotantes (Gimballed) [41]</i>	39
1.8.4	ELEMENTOS DEL SISTEMA DE EJES FLOTANTES	40
1.8.4.1	<i>Unidad de Medidas Inerciales [42]</i>	40
1.8.4.1.1	<i>Acelerómetro</i>	41
1.8.4.1.2	<i>Giroscopio</i>	41
1.8.4.2	<i>Actuadores</i>	42
1.8.4.2.1	<i>Motor Brushless [43]</i>	42
1.9	SISTEMAS DE CONTROL DISCRETO	44
1.9.1	DEFINICIÓN	44
1.9.2	ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL DISCRETO	44
1.9.3	TIPOS DE CONTROLADORES [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50]	45
1.9.3.1	<i>PID</i>	46
1.9.3.2	<i>IMC</i>	49
1.10	MICROCONTROLADOR	50
1.10.1	FAMILIA ARM CORTEX M	50
	CAPÍTULO 2	52
	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE	52
2.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	52
2.2	ELEMENTOS DEL SISTEMA	53
2.2.1	CAMARA DIGITAL	53
2.2.1.1	<i>Selección de la cámara</i>	53
2.2.1.2	<i>Firmware [52]</i>	56
2.2.1.3	<i>Acondicionamiento de la Cámara [53] [54] [55]</i>	57
2.2.2	GIMBALLED	62
2.2.2.1	<i>Especificaciones</i>	63

2.2.2.2	<i>Unidad Inercial IMU</i>	63
2.2.2.3	<i>Tarjeta de control</i>	65
2.2.2.4	<i>Algoritmo de control</i>	67
2.2.1	COMUNICACIÓN.....	70
2.2.1.1	<i>Selección de frecuencias</i>	70
2.2.1.2	<i>Comunicación de Video</i>	72
2.2.1.3	<i>Comunicación de Datos</i>	73
2.2.1.4	<i>Gestor de comunicación</i>	76
2.3	ESTRUCTURA DE MONTAJE.....	78
2.4	SISTEMA COMPLETO	79
CAPÍTULO 3		82
DESARROLLO DEL SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN Y HMI.		82
3.1	VISUALIZACION	82
3.2	CONTROL	83
3.3	PROCESAMIENTO.....	83
3.3.1	ALGORITMO DE PROCESAMIENTO	84
3.3.2	METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN	85
3.3.2.1	<i>Calibración de Balance de Blancos</i>	86
3.3.2.2	<i>Calibración de Reflectancia por Comparación Directa</i>	87
CAPÍTULO 4		93
PRUEBAS Y RESULTADOS		93
4.1	COMUNICACIÓN.....	93
4.1.1	Enlace de Video.....	93
4.2	DISPOSITIVO DE ESTABILIZACIÓN GIMBALLED.....	95
4.2.1	Respuesta del controlador.....	95
4.2.2	Prueba de ángulos de Giro.....	98
4.3	CÁMARA MULTIESPECTRAL	99
4.3.1	Prueba de Reflectancia de Materiales.....	99
4.3.2	Prueba cualitativa de imágenes	100
4.4	PRUEBA EN PLATAFORMA AÉREA.....	105
4.5	RECONOCIMIENTOS	114

4.5.1	Galardón Nacional 2014, II Concurso de Reconocimiento a la Investigación Universitaria Estudiantil	114
4.5.2	2014 IEEE 2014 IEEE Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing – ROPEC XVI	115
4.5.3	Feria INNOPOLIS – Yachay 2015.....	116
	CAPÍTULO 5	117
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
	REFERENCIAS	119
	ANEXOS	126

RESUMEN

El desarrollo y aplicación de sistemas electrónicos de medición de vegetación en la agricultura y medio ambiente aumenta la productividad del agro y la calidad de vida en el país. Uno de los sistemas electrónicos de medición más usados en este campo utiliza el índice Diferencial Normalizado de Vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) [1], el cual se basa en imágenes aéreas multiespectrales.

En Ecuador existe la posibilidad de tomar fotografías multiespectrales satelitales de áreas específicas de vegetación para determinar ciertas características como: salud, densidad, cobertura, etc. Estas imágenes tienen un alto costo y poseen una resolución espacial de hasta 250m [2]. Para aplicaciones de áreas específicas, este tipo de tecnología no brinda una opción viable. En este contexto, este proyecto brinda una solución económica de rápida implementación.

Entre las principales aplicaciones del NDVI se encuentran: la verificación de daño de contaminación de bosques y reservas ecológicas, la prevención de sequías en plantaciones, la realización de acciones de control mediante un historial cronológico de la zona, la verificación de la restauración ambiental en proyectos de reforestación, entre otras [3].

El sistema está construido sobre la base de dispositivos comerciales, incluyendo una cámara *Point & Shoot* con control de disparo, filtro de gel, un estabilizador y posicionador de ejes libres, un transmisor de video a 5,8 GHz y un transceptor *ZigBee* para datos. Para facilitar el uso por parte del operador, se implementó un HMI realizado en Matlab® que incluye opciones de procesamiento de imágenes multiespectrales y control de la cámara.

ABSTRACT

Development and application of electronic systems for vegetation measurements raises the agro productivity and quality of life of a country. One of the most used measurement electronic systems is based on NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [1] which uses aerial multispectral images.

In Ecuador, The option is taking multispectral satellite photos of specific crop areas for quantifying: crop health, crop density, vegetation coverage, etc. Those images have high cost and their spectral resolution is 250m [2]. For small areas, satellite technology is not a well option. In this context, this project brings cheap and fast solution.

The most common NDVI applications are verification of forest contamination, drought prevention, chronology of vegetation health, verification of forest remediation, etc. [3]

This work presents the methodology to develop, calibrate and test an aerial multispectral image system and the processing software to calculate NDVI at specific zones.

This system has been built in base of consumer devices as Point&Shot Camera with trigger and focus control, Gel Filters, free axis stabilizer, 5.8GHz RF transceiver for video streaming and ZigBee transceiver for data link.

HMI, camera position control, trigger and multispectral images processing are done with code written in MATLAB ®.

PRESENTACION

En el siguiente proyecto se presenta una metodología para el desarrollo, calibración y prueba de un sistema multiespectral adaptable a una plataforma aérea para obtener imágenes de bajo costo, posteriormente procesadas por computador para obtener el índice NDVI de áreas localizadas.

Capítulo 1, está compuesto por la sustentación teórica que se utiliza a lo largo de los siguientes capítulos.

Capítulo 2, describe el diseño e implementación del hardware que se utilizó, el cual consta de la cámara multiespectral, el sistema de estabilización y posicionamiento, los sistemas de comunicación y la estructura donde se montan todos los sistemas.

Capítulo 3, consiste en el desarrollo del software de procesamiento digital de la imagen y HMI, adicionalmente consta la metodología de calibración de la cámara multiespectral. El software fue desarrollado en Matlab® e incluye opciones de procesamiento de imágenes multiespectrales y control de la cámara.

Capítulo 4, muestra las pruebas y resultados obtenidos del sistema multiespectral como: alcance de la comunicación de datos y video, respuesta del controlador de estabilización, pruebas de reflectancia de materiales de la cámara multiespectral y prueba cualitativa de imágenes NDVI.

Capítulo 5, está formado por las conclusiones y recomendaciones referentes al presente proyecto.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GENERAL

Controlar y adaptar dispositivos comerciales para obtener imágenes aéreas de bajo costo con el índice NDVI (Índice Normalizado Diferencial de Vegetación).

1.1.2 ESPECÍFICOS

- Adaptar una cámara comercial para que sea capaz de tomar fotografías NGB (*near infrared-green-blue*).
- Realizar el procesamiento digital de la imagen para obtener el índice NDVI de cada pixel.
- Acoplar la cámara NDVI a una plataforma aérea de operación manual.
- Controlar de manera remota el disparo y posición de la cámara NDVI.
- Proponer las posibles aplicaciones del índice NDVI en Ecuador.

1.2 ÍNDICE DE VEGETACIÓN POR DIFERENCIA NORMALIZADA

1.2.1 DEFINICIÓN

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada conocido también como NDVI por sus siglas en inglés, es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación refleja por medio de sensores instalados comúnmente desde una plataforma espacial. [3] [4]

1.2.2 ANTECEDENTES [5] [6]

El índice de vegetación aprovecha la alta absorción de las bandas del espectro visible y la fuerte reflectancia del infrarrojo cercano y busca la relación entre la

banda del infrarrojo cercano (IR) (700-1300 nm) y la banda del rojo (650 nm). La primera utilización por Jordan en 1969) [7] del índice de Vegetación fue simplemente la relación entre el la banda del IR y el canal visible del Rojo. Todavía se usa, en muchas ocasiones, el índice antes descrito aunque presenta la dificultad que el rango varía entre 0 a infinito.

Por la dificultad antes mencionada en cual se presenta el NDVI, descrito por primera vez por Rouse et al. [8] en 1973, tiene la ventaja de que solo varía de -1 a +1.

Debido a que los primeros instrumentos usados para la observación terrestre, tales como el Satélite de Tecnología de Recursos Terrestres (*Earth-Resources Technology Satellite*, ERTS) desarrollado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) y el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (*Advanced Very High Resolution Radiometer*, AVHRR) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA) adquirían datos en el rojo e infrarrojo cercano, fue natural hacer uso de las marcadas diferencias en la reflexión vegetal para determinar su distribución espacial en las imágenes satelitales.

Hoy en día existe una gran variedad de modificaciones del NDVI usadas para aplicaciones específicas.

1.2.3 FORMULA Y FUNDAMENTOS

1.2.3.1 Fundamentos

Las plantas absorben luz solar en la región espectral de radiación fotosintética activa, la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis que se muestra en la Figura 1.1. Las células vegetales han evolucionado para dispersar la radiación solar en la región espectral del infrarrojo cercano, la cual lleva aproximadamente la mitad del total de la energía solar, debido a que el nivel de energía por fotón en ese dominio (de longitud de onda mayor a los 700 nm) no

es suficiente para sintetizar las moléculas orgánicas. Una fuerte absorción en este punto sólo causaría en un sobrecalentamiento de la planta que dañaría los tejidos.



Figura 0.1.- Reflexión de luz infrarroja y visible en la vegetación, tomado de [9]

1.2.3.2 Formulación [5]

La fórmula de NDVI Ec.(1.1) está dada por la relación entre la adición y la diferencia entre el Infrarrojo cercano y el campo visible.

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (1.1)$$

Donde NIR es la reflectancia en la banda de Infrarrojo Cercano y VIS es la reflectancia en la banda del visible.

Estas reflexiones espectrales son en sí cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual; por tanto, éstos toman valores entre un rango de 0.0 a 1.0. El NDVI varía como consecuencia entre -1.0 y +1.0.

No existen longitudes de ondas “típicas” para los sistemas NDVI, cada sistema puede ser diseñado la cumplir los requerimientos del proyecto de investigación.

En Tabla 1.1 se presentan las longitudes de ondas usadas en distintos estudios para la obtención de NDVI.

Tabla 0.1.- Longitudes de Onda de Sistemas NDVI usados, tomado de [10]

Ground truth for AVHRR satellite	Visible	570-680 nm
	Infrarrojo cercano	725-1100 nm
Ground truth for Landsat satellite	Visible	450-650 nm
	Infrarrojo cercano	750-900 nm
Ground truth for MODIS satellite	Visible	450-680 nm
	Infrarrojo cercano	835-890 nm
Densidad de cultivos	Visible	650 nm (10 nm <i>bandwidth</i>)
	Infrarrojo cercano	800 nm (10 nm <i>bandwidth</i>)

El NDVI está directamente relacionado con la capacidad fotosintética, por tanto, con la absorción de energía por la cobertura arbórea.

El estrés de las plantas, ya sea debido a agua, nutrientes, calor, etc., puede ser difícil de detectar, sobre todo durante las etapas tempranas. Un indicador de estrés vegetal es la absorción de luz y reflexión. Como la clorofila absorbe la banda roja de la radiación entrante, la reflexión es relativamente baja debido a la fuerte absorción de luz por los pigmentos vegetales.

Una alta reflexión en la banda del infrarrojo cercano es causada por la estructura celular del follaje. Cuando las plantas se encuentran bajo estrés, la reflexión de la

luz de banda roja se incrementa debido a la reducción de absorción por la clorofila. La reflexión en la banda del infrarrojo cercano disminuye debido al deterioro de la estructura celular. El índice de diferencia normalizada vegetal es una unidad de medida diseñada para tomar en cuenta la reflexión tanto en la banda del rojo como del infrarrojo cercano.

1.2.4 INSTRUMENTACIÓN

La forma tradicional de obtener la imagen en NDVI es usando dos sensores CCD con filtro pasabanda; el primer CCD dejará pasar solo el espectro visible y el segundo dejará pasar solo el espectro NIR. Con esta configuración, el cálculo de NDVI, se realizaría de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{NIR(sensor1) - RGB(sensor2)}{NIR(sensor1) + RGB(sensor2)} \quad (1.2)$$

Donde “sensor1” será el sensor CCD con filtro pasabanda NIR y “sensor2” será el CCD con filtro pasabanda visible. Este tipo de configuración tiene varias dificultades de implementación, entre ellas: disparo sincronizado de los dos sensores, superposición de imágenes, peso y volumen del hardware (aspecto importante en sistemas para plataformas aéreas).

En el mercado existen varios instrumentos de sensado multiespectral los cuales están clasificados en dos grandes grupos:

- Instrumentos de uso comercial
- Instrumentos aéreos

1.2.4.1 Instrumentos de uso comercial

La mayoría de dispositivos comerciales son *handheld* usados para áreas puntuales no mayores a 3m. Estos dispositivos se utilizan para sacar muestras en plantaciones y realizar su posterior análisis.

A continuación se presentan los dispositivos disponibles en el mercado:

- **Dispositivo de medición de clorofila *Fieldscout***

Este dispositivo es utilizado principalmente para la medición de NDVI de las hojas de cada planta y del césped, en la Figura 1.2 se muestra el dispositivo con sus especificaciones.



Figura 0.2.- Dispositivo de medición de clorofila *Fieldscout* cm 1000 NDVI, tomado de [11]

Tipo de muestra: Hojas de plantas, césped

Sistema de medida: Reflectancia de luz a 660nm y 840nm

Área de Medida: Área cónica entre 12 a 72 pulgadas.

Distancia mínima: 12 in (30.5 cm) desde el lente.

Distancia máxima: Precisión no se asegura más allá de 72 in

Área de la muestra (diámetro):

12 in (30.5 cm) 0.53 in (1.35 cm)

18 in (45.7 cm) 1.21 in (3.07 cm)

48 in (1.22 m) 4.65 in (11.8 cm)

Sensor: (4) fotodiodos: (2) luz ambiental, (2) reflectancia

Unidad de medida: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* con escala de -1 to 1)

Intervalo de medida: 2 segundos por muestra

Repetitividad: $\pm 5\%$ de la medida.

- **Dispositivo de mano *GreenSeeker***

Este dispositivo provee el análisis NDVI para saber la salud de la vegetación y así realizar un mejor manejo de los nutrientes en la plantación, en la Figura 1.3 se tiene la imagen del dispositivo.



Figura 0.3.- GreenSeeker® Handheld Crop Sensor tomado de [12]

Distancia de medida: 60-120 cm
 Área de medida (oval): 25 cm-50 cm de diámetro mayor
 Unidad de Medida: NDVI promedio 0.00 - 0.99
 Pantalla LCD para medida rápida.
 Software para *datalogging*.

1.4.1.2 Instrumentos Aéreos [13] [14]

Para los instrumentos aéreos existen varios tipos de sensores como: Landsat TM/ETM+, SPOT/HRG, ASTER, CBERS, HJ-1A/1B, etc., los cuales proveen información detallada de varias bandas espectrales. Esta información puede ser representada en imágenes, una por cada banda, las cuales se usan para el cálculo de NDVI así como también de otros índices de vegetación.

Hay tres métodos de obtención de imagen, los cuales se muestran en la figura 1.4:



Figura 0.4 .- Principios del sensado por imagen, tomado de [13]

- **Cámara (fotografía aérea):** Se obtiene una imagen aérea con un arreglo de CCD o CMOS. El área de cobertura es proporcional a la altura del sensor y a sus dimensiones. El ángulo del sensor está determinado por la óptica de los lentes de la cámara. Es posible realizar un barrido en dirección del movimiento de la plataforma aérea a fin de aumentar el área de cobertura.
- **Whiskbroom scanner:** Se obtiene la imagen con un único sensor o pixel CCD o CMOS, el mismo que realiza un barrido transversal del territorio mediante un espejo móvil. El área de cobertura depende de la velocidad, el ángulo de giro del espejo móvil y del movimiento longitudinal de la plataforma aérea. En la Figura 1.5 se muestra el esquema del interior del dispositivo.

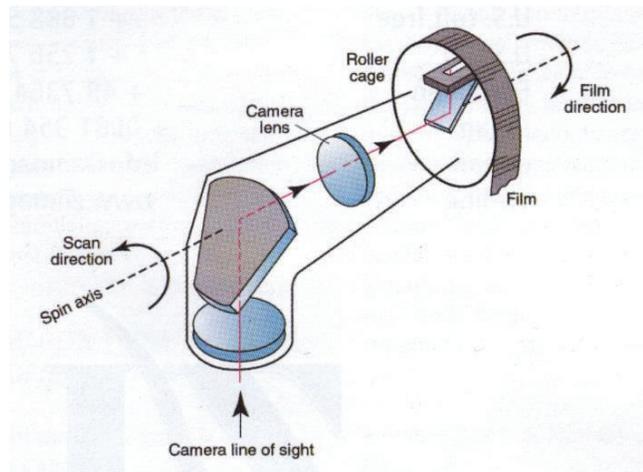


Figura 0.5.- Esquema interior de *Whiskbroom scanner*, tomado de [14]

- ***Pushbroom scanner***: Se obtiene la imagen de una franja del terreno mediante un arreglo lineal CCD o CMOS. Para realizar imágenes de un área se hace un barrido del terreno aprovechando el movimiento de la plataforma aérea.

Los tres tipos de métodos de obtención de imagen funcionan en base a los siguientes parámetros, en la Figura 1.6 se muestra la forma de obtención de imagen y en la Tabla 1.2 la explicación de cada parámetro:

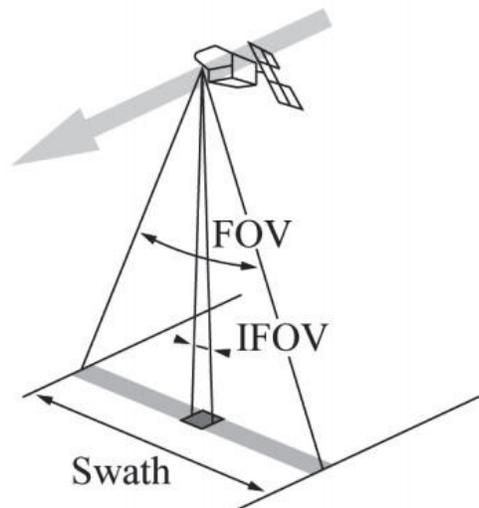


Figura 0.6.- Parámetros de sensado aéreo por imagen, tomado de [14]

Tabla 0.2.- Parámetros para el sensado aéreo por imagen tomado de [14]

Parámetro	Descripción
Resolución espacial:	Distancia entre los centros de píxeles sobre una superficie
IFOV (<i>Instantaneous Field of view</i>)*:	El campo de visión instantáneo (1.3) está relacionado con el ángulo en el sensor. $IFOV = \text{ángulo de apertura del sensor} * \text{altura} \quad (1.3)$
Ángulo de visión (d)**:	Es el ángulo formado por los rayos que van a los lados extremos opuestos del sensor.
Swath*:	Ancho de la imagen en dirección ortogonal al trazado terrestre.
FOV (<i>Field of View</i>):	Campo de la visión
Resolución Espacial:	Número de píxeles por área terrestre. (Incrementa cuando los píxeles son más pequeños)
Resolución espectral:	Número de bandas por longitud de onda. Global: Incrementa con el número de bandas. Localmente: Incrementa cuando la diferencia entre bandas sucesivas se hace pequeña.
Resolución radiométrica:	Numero de valores para las variaciones de gris=2p. Donde p=número de bits por valor.
Longitud focal (f)**:	Es la distancia entre el centro del lente y el foco (CCD o CMOS), determina la escala de la fotografía.
Escala (s)**:	La escala de una fotografía aérea (1.4) o de un mapa se expresa como la relación de la distancia entre dos puntos de la fotografía y la distancia real sobre la superficie. $\text{escala } (s) = f / \text{altura} \quad (1.4)$

* Válido sólo para sensores satelitales

** Válido sólo para cámaras aéreas

A continuación, se detallan varias cámaras aéreas y satelitales desarrolladas por empresas o institutos de investigación:

- **Cámara Multiespectral *Resource Mapping MS-4100* [15]**

Esta cámara usa 3 sensores de imagen de 19616x1078 píxeles con filtros pasabanda, la estructura interna se muestra en la Figura 1.7. Un prisma duplicador de imagen se ubica antes de los sensores de imagen a fin de tener simultáneamente la imagen en los tres sensores; en la Figura 1.8 se muestra la respuesta espectral.

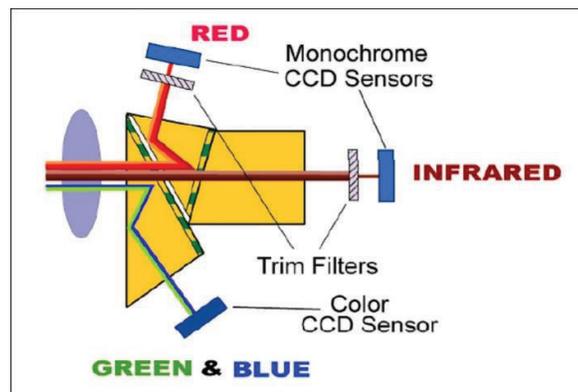


Figura 0.7.- Estructura interna *Resource Mapping MS-4100* tomado de [15]

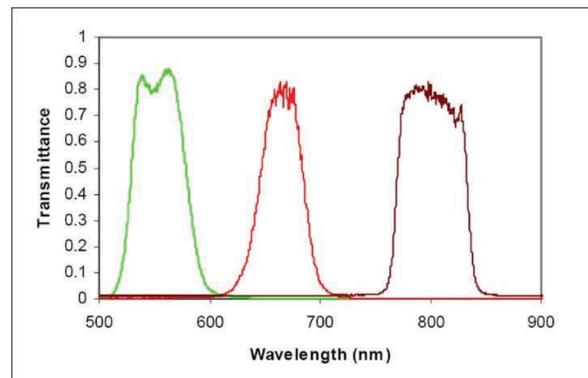


Figura 0.8.- Respuesta espectral *Resource Mapping MS-4100* [15]

- **Cámara Multiespectral del Instituto de Imagen y Visión por Computadora (*Lehrstuhl für Bildverarbeitung*) LfB, RWTH Aachen University**

Esta cámara posee un sensor CCD monocromático de respuesta en todo el espectro de la visión y una rueda de 7 o 19 filtros de color pasabanda ubicados entre el CCD y los lentes, los cuales rotan al realizar la captura, esto permite que se realicen 7 o 19 fotografías diferentes, una en cada banda espectral correspondiente al filtro usado. La cámara es mostrada en la Figura 1.9 y en la Figura 1.10 la respuesta espectral.



Figura 0.9.- Cámara Multiespectral de *Institute of Imaging & Computer Vision* tomado de [16]

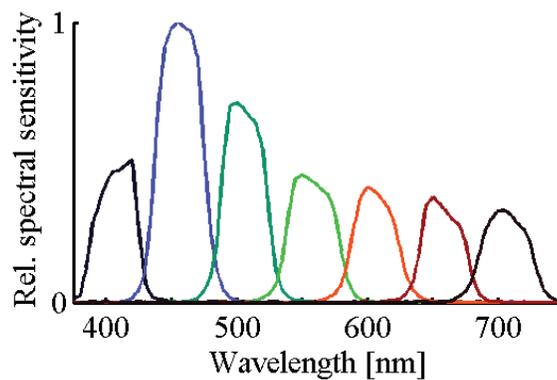


Figura 0.10.- Respuesta espectral de cada filtro de la Cámara tomado de [16]

- **Arreglo Lineal Multiespectral de cámaras de *Chemnitz University of Technology* [17]**

Este arreglo de cámaras dispone de 4 sensores RGB y 3 filtros pasabanda ubicados frente a 3 de los filtros, de tal manera que, permite obtener 12 imágenes, de 50nm de ancho de banda, capturados simultáneamente, el esquema se muestra en la Figura 1.11. Se usa para aplicaciones donde el objeto a fotografiar este ubicado a una distancia de 0.7 -1.5 m.

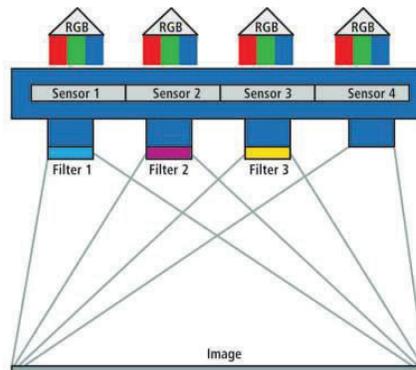


Figura 0.11.- Esquema interno del Arreglo Lineal Multiespectral de cámaras de *Chemnitz University of Technology*, tomado de [17]

- **Landsat 7 TM/ETN+ [18] [19]**

Landsat 7 es el séptimo satélite lanzado el 15 de Abril de 1999 y administrado por USGS (*United States Geological Survey*)-NASA de Estados Unidos. El principal objetivo de Landsat es realimentar el archivo global de imágenes satelitales con datos actuales sin presencia de nubes. Posee 8 bandas espectrales las cuales capturan diferentes imágenes del mismo espacio de terreno y son combinadas para su posterior análisis.

En la Tabla 1.3 se presentan las especificaciones del sensor satelital Landsat y en la Tabla 1.4 se presentan las bandas espectrales usadas.

Tabla 0.3.- Especificaciones del satélite Landsat 7, tomado de [18]

Fecha de lanzamiento	15 April 1999, Vandenberg Air Force Base, California
Resolución espacial	30 metros
Orbita	705 +/- 5 km (sobre el Ecuador)
Inclinación orbital	98.2 +/- 0.15
Periodo orbital	98.9 minutos
Ciclo de repetición de trazabilidad en tierra	16 días (233 orbitas)
Resolución	15 a 90 metros
Altitud	705 kilómetros +/- 5 km

Tabla 0.4.- Bandas espectrales del satélite Lansat, tomado de [19]

Banda #	Rango espectral (micrómetros)
1	.45 to .515
2	.525 to .605
3	.63 to .690
4	.75 to .90
5	1.55 to 1.75
6	10.40 to 12.5
7	2.09 to 2.35
Pan	.52 to .90

Las siguientes imágenes en la Figura 1.12 muestran un ejemplo de imagen multiespectral (tomadas por Landsat 7 en Angora Lakes-US. [20])

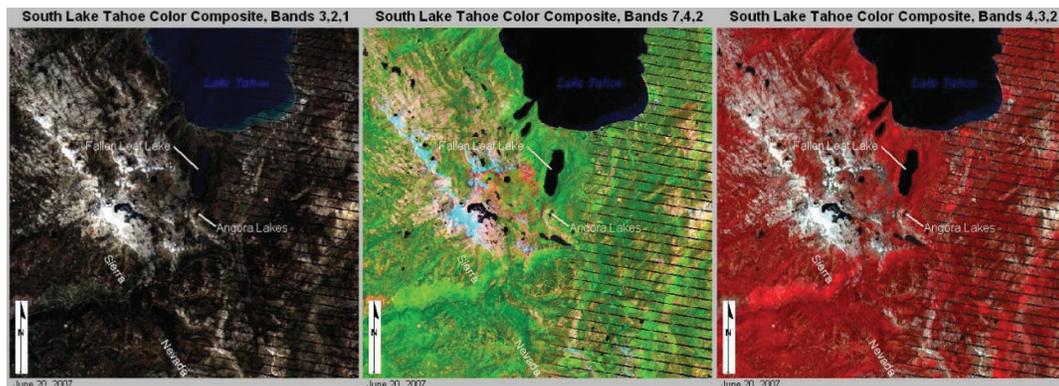


Figura 0.12.- Imágenes multispectrales por bandas compuestas en Landsat 7 tomada de [20]

1.2.5 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN NDVI [21] [22] [23]

El estándar NDVI está definido en dos grupos dependiendo de su calibración: NDVI calibrado y NDVI relativo.

NDVI relativo, es una medida del vigor relativo de las plantas sobre un área de interés, sirve para evaluar problemas puntuales del suelo y el estrés de la vegetación pero puede resultar insuficiente para realizar comparaciones anuales. Es útil para identificar patrones y áreas segregadas de diferentes tratamientos o cosechas sobre el mismo cultivo.

$$NDVI \text{ Relativo} = 100 * \frac{NDVI - \text{Min}(NDVI)}{\text{Max}(NDVI) - \text{Min}(NDVI)} \quad (1.5)$$

NDVI calibrado, es producido sobre una escala fija y por tanto puede ser comparado en diferente tiempo y en diferente localidad. Para el NDVI calibrado es necesario realizar una calibración radiométrica de balance de blancos, vignetting y de reflectancia sobre la imagen del CCD.

$$NDVI \text{ Calibrado} = NDVI \quad (1.6)$$

Según [24] , el nivel mínimo de precisión para la interpretación de índices de vegetación mediante técnicas de sensado remoto debe ser al menos 85%. Por ejemplo, la precisión en MODIS es de ± 0.025 en el valor de NDVI [25]

1.2.5.1 Métodos de calibración [26]

La calibración establece una relación entre el instrumento que va a ser calibrado y el patrón, esta relación se obtiene al tomar las indicaciones del equipo y del patrón y relacionarlas como: error, corrección o linealidad, con una respectiva incertidumbre. El equipo y/o patrón puede dar esa indicación mediante mediciones directas, indirectas, o bien realizar representaciones o reproducir un valor. Por lo cual, existen métodos de calibración que se derivan de estos y son:

- Comparación Directa
- Transferencia
- Sustitución
- Equilibrio
- Escalamiento
- Relación

A continuación se explica la calibración por comparación directa debido a que se utiliza posteriormente.

- **Calibración por comparación directa**

El método consiste en la comparación directa e instantánea de los valores proporcionados por el instrumento bajo calibración, contra los valores proporcionados por un patrón, a fin de obtener una curva o función de calibración.

1.2.6 APLICACIONES

El análisis multiespectral NDVI ofrece una gran cantidad de aplicaciones orientadas en la vegetación, a continuación se listan algunas.

1.2.6.1 Seguimiento de una sequía [27]

Durante los meses de noviembre de 1999 a marzo de 2000 se produjo en Uruguay una intensa sequía. Ésta fue seguida desde la estación de rastreo de El Pinar a través de imágenes NOAA de 1 km de resolución y calculando los índices de vegetación. Las imágenes obtenidas se representan en la secuencia histórica mensual, que se muestra en la Figura 1.13:

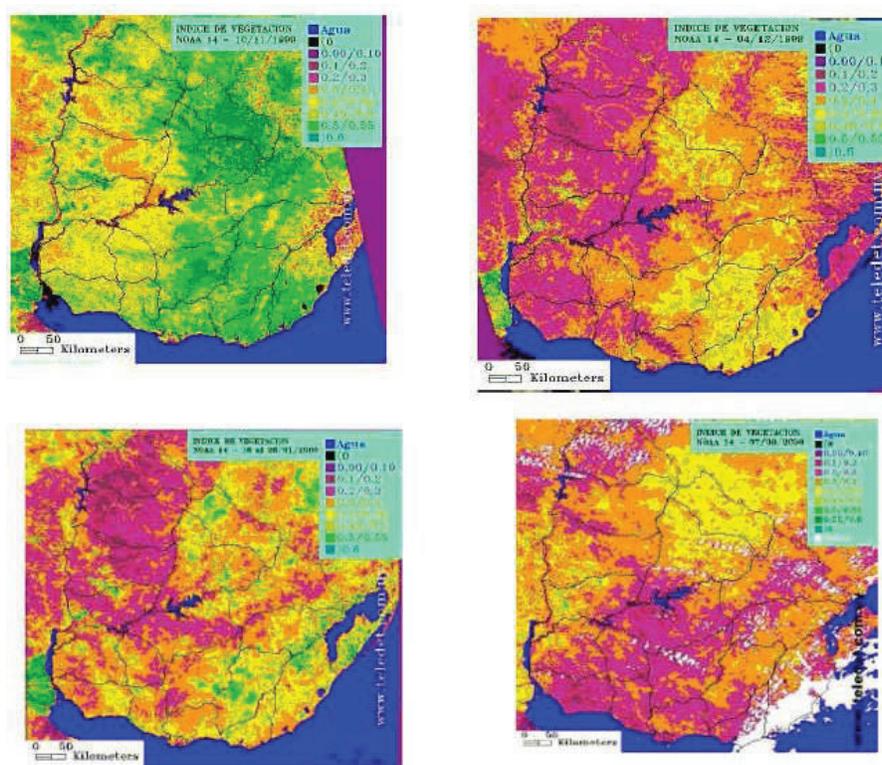


Figura 0.13.- Seguimiento de sequía en Uruguay con imágenes Satelitales, tomado de [27]

1.2.6.2 Seguimiento de cultivos [27]

Se ha realizado el seguimiento temporal de algunas arroceras a lo largo de un pequeño sector del Río Cuareim cerca de la ciudad de Artigas -Uruguay. Las imágenes cubren aproximadamente 14 km x 14 km y fueron extraídas de una imagen Landsat estándar de 185 km x 185 km.

Las imágenes se tomaron de una arrocera que posee un NDVI de 0.1 - 0.2. Se observan otras áreas (blancas) cuyos índices son prácticamente cero y con menores desarrollo que la de referencia.

Se muestra en la Figura 1.14 la situación a los 8 meses de la primera fotografía, puede observarse cómo el NDVI de la referencia ha aumentado a aproximadamente 0.7. Se observa que algunas áreas blancas han elevado su NDVI, obviamente se trata de otras arroceras en diferentes estados de evolución.

Se ve cómo la percepción remota ofrece la posibilidad de monitorear el estado de los cultivos y al estar las imágenes georreferenciadas también permiten calcular las áreas cultivadas.

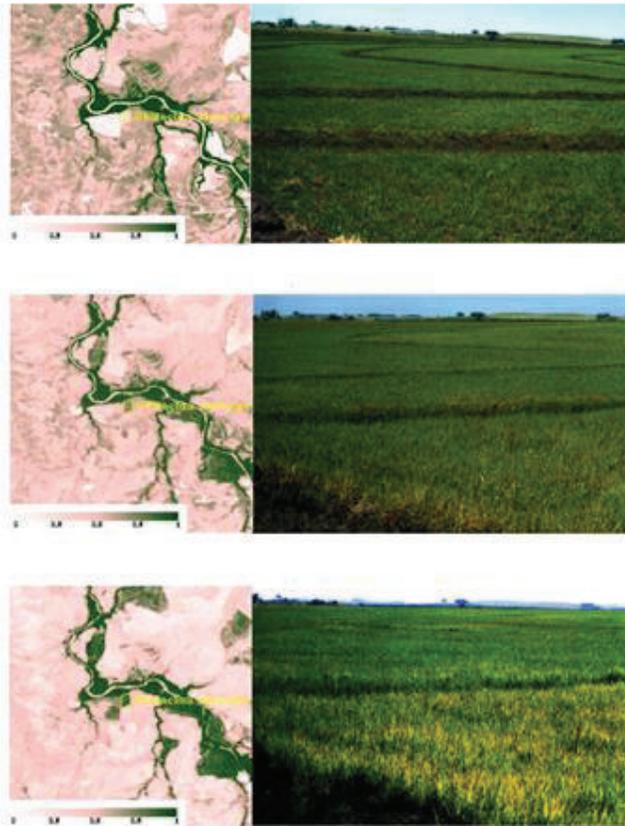


Figura 0.14.- Monitoreo de Cultivos por imagen NDVI, tomado de [27]

1.2.6.3 Predicción de rendimiento de trigo [28]

Se ha logrado una estimación de rendimiento de trigo a partir de una función exponencial que requiere como dato de entrada un mapa de NDVI.

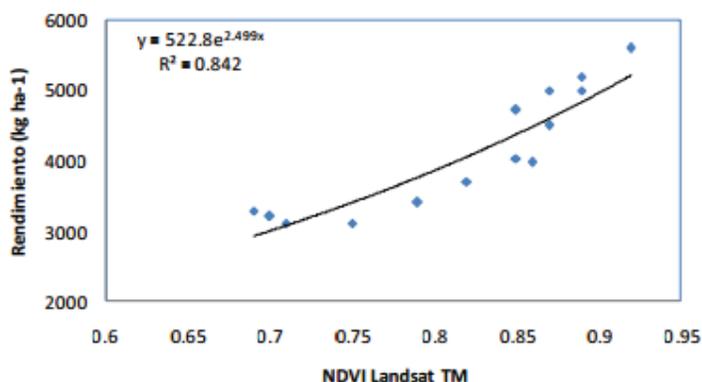


Figura 0.15.- Rendimiento del trigo vs NDVI Ladsat TM, tomado de [28]

En la Figura 1.15 puede apreciarse una relación directa entre el rendimiento del trigo y el índice de vegetación (estimado a partir de una imagen *Landsat 5 Thematic Mapper*). Las variaciones del índice reproducen adecuadamente los cambios en el rendimiento de trigo. La validación de la función de rendimiento muestra que el modelo presenta un error de estimación del 12% con tendencia a sobreestimar del orden de 168 kg. Se puede observar que para rendimientos bajos el modelo sobreestima y que para rendimientos superiores a los 4800 kg el modelo subestima.

El trabajo destaca la utilidad de las imágenes de satélite de resolución espacial de 30 m por 30 m. Dicha resolución es la apropiada para su uso en agricultura de precisión, particularmente en la delimitación y determinación de rendimientos a escala de parcela.

1.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

1.3.1 DEFINICIÓN [29]

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas.

El espectro electromagnético (Figura 1.16) se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio. Formalmente el espectro electromagnético es infinito y continuo.

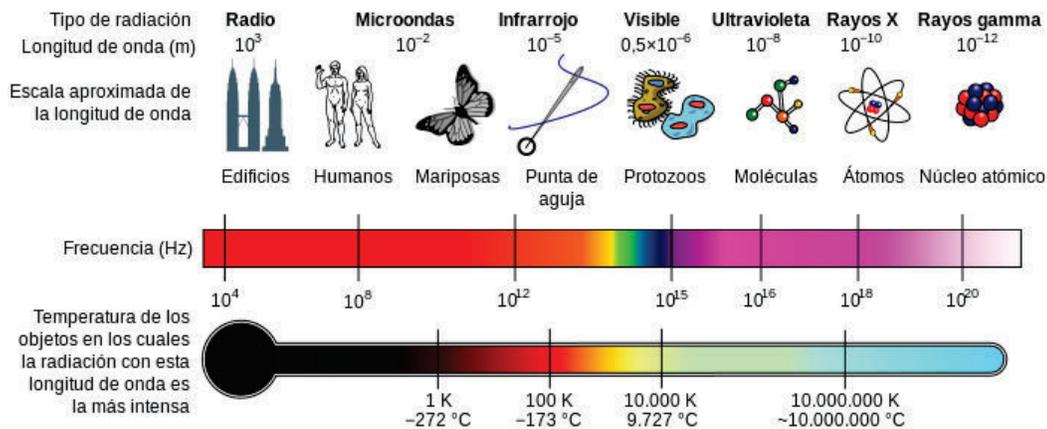


Figura 0.16.- Espectro Electromagnético, tomado de [29]

1.3.2 ESPECTRO VISIBLE

Se le llama espectro visible a la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. A la radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se le llama luz visible o simplemente luz. No hay límites exactos en el espectro visible; un típico ojo humano responderá a longitudes de onda desde 400 a 700 nm aunque algunas personas pueden ser capaces de percibir longitudes de onda desde 380 a 780 nm, el espectro se muestra en la Figura 1.17.

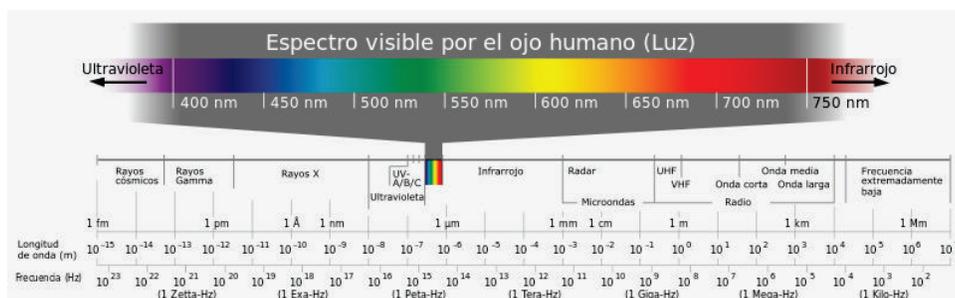


Figura 0.17.- Espectro visible, tomado de [30]

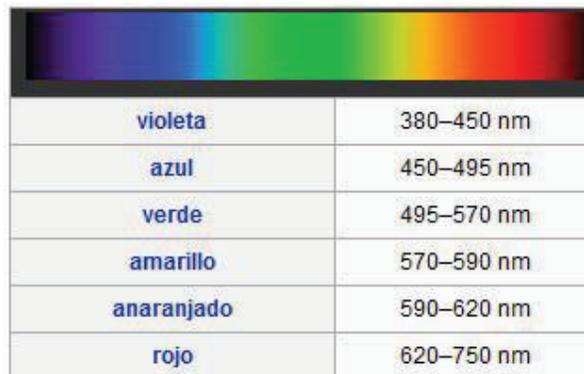


Figura 0.18.- Rango de longitud de onda por colores, tomado de [30]

Se puede definir a la luz visible como la onda de longitud que va desde los 380nm hasta los 750nm, en Figura 1.18 se presenta el rango espectral por colores.

1.3.3 ESPECTRO DE INFRARROJO CERCANO

El infrarrojo cercano es la región de longitud de onda más cercana del espectro visible, situada entre la luz visible y el infrarrojo medio, aproximadamente entre 800 y 2.500 nanómetros, no existe una definición universalmente aceptada.

1.4 ADQUICISIÓN DIGITAL DE IMAGEN [31] [32]

1.4.1 SENSOR DE IMAGEN DIGITAL CCD/CMOS

1.4.1.1 Definición

En fotografía digital, el CCD (*charge-coupled device*) o el CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*) es un sensor con pequeñas células fotoeléctricas que registran la imagen que es procesada por la cámara y se guardan en un chip de memoria.

La diferencia entre estos sensores radica en que el CCD es un circuito integrado que contiene un número determinado de células fotoeléctricas y condensadores enlazados los cuales transmiten su carga entre si y hacia un registro de

desplazamiento, un amplificador y un conversor A/D, el mismo que es controlado por un chip externo de pre-procesamiento encargado de reconstruir estos datos en imagen.

Los sensores CMOS en cambio tienen la característica de que cada celda es independiente. La digitalización de los píxeles se realiza internamente en unos transistores que lleva cada celda, por lo que todo el trabajo se lleva a cabo dentro del sensor y no se hace necesario un chip externo encargado de esta función. Con esto se consigue reducir costes y equipos más pequeños.

La capacidad de resolución o detalle de la imagen depende del número de células fotoeléctricas del CCD/CMOS. Este número se expresa en píxeles.

1.4.1.2 Funcionamiento

Tanto los detectores CCD y CMOS, al igual que todas las células fotovoltaicas, se basan en el efecto fotoeléctrico, es decir en la capacidad de ciertos materiales semiconductores de absorber fotones y transformarlos en corriente eléctrica, proporcional a su número.

Los píxeles del CCD y CMOS registran gradaciones de los tres colores básicos: rojo, verde y azul (RGB).

1.4.2 FOTOGRAFÍA RGB [32] [33]

1.4.2.1 Definición

RGB (*Red Green Blue*) es una composición del color en una imagen en términos de la intensidad de los colores primarios de la luz. Para conseguir esta separación de colores la mayoría de cámaras CCD/CMOS utilizan el mosaico de Bayer, el cual es una matriz de filtros que se sitúan frente del CCD/CMOS.

1.4.2.2 Mosaico de Bayer

El mosaico de Bayer es una matriz de filtros que está formada por un 50% de filtros verdes, un 25% de rojos y un 25% de azules. Interpolando dos muestras

verdes, una roja, y una azul se obtiene un pixel de color. Se muestra en la Figura 1.19 la matriz de filtros.

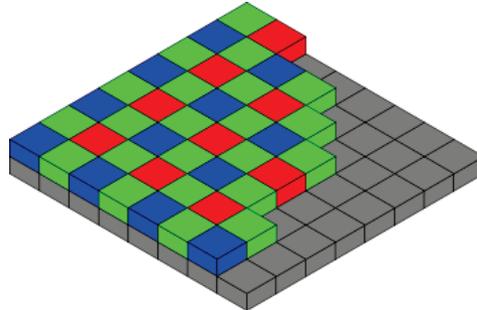


Figura 0.19.- Mosaico de Bayer, tomado de [33]

En los ficheros RAW de las cámaras de fotos digitales se guarda la información del patrón de Bayer de forma directa, sin interpolaciones, lo cual puede ser aprovechado posteriormente por los programas de revelado digital para una decodificación de mayor calidad que la que permiten los algoritmos internos presentes en los dispositivos de captura.

1.4.3 FOTOGRAFÍA MULTIESPECTRAL NRG [34]

NRG (*Near-infrared / Red / Green*) al igual que fotografías NDVI son construidas en base a las imágenes multiespectrales, se utilizan para visualizar la cantidad de infrarrojo y luz de otras longitudes de onda reflejada por la vegetación; relacionan porcentajes de luz azul y roja absorbido versus verde e infrarroja usados para evaluar la salud de la vegetación.

En la Figura 1.20 se muestra la disposición de canales para componer fotografías NRG y su posterior visualización en falsos colores RGB. Al igual que la fotografía NRG es posible obtener otras variaciones como el NGB (*Near-infrared / Green / Blue*), la cual tiene la misma función pero con la ventaja de distinguir mayormente las bandas visibles del infrarrojo.

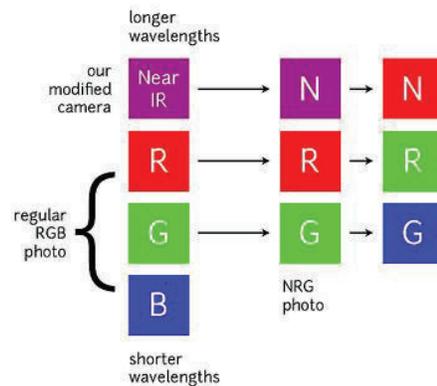


Figura 0.20.- Composición de Imagen NRG tomado de [34]

1.5 CORRECCIÓN DE IMAGEN

1.5.1 DEFINICIÓN

La corrección de imagen es el ajuste de los parámetros fotográficos: Brillo, Contraste, Balance de Blancos, Corrección de Gama, *Vignetting*, entre otros; para obtener la imagen requerida. La corrección de imagen se realiza a la imagen Raw utilizando varios algoritmos como se muestra en la Figura 1.21.



Figura 0.21.- Proceso de corrección de Imagen

1.5.1.1 Fotografía Raw

La fotografía en RAW utiliza el formato de imagen sin modificaciones, es decir, que son los datos del sensor CCD o CMOS sin ser procesados. El formato de imágenes RAW "formato de imagen sin modificaciones" es un formato de archivo digital de imágenes que contiene la totalidad de los datos de la imagen tal y como ha sido captada por el sensor digital de la cámara fotográfica.

1.5.1.2 Fotografía JPEG

JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) es un algoritmo de compresión con pérdida para imágenes fotográficas. Posee algunas ventajas, siendo la principal el alto porcentaje de compresión manteniendo la fotografía a una calidad aceptable. Fue desarrollado por el Joint Photographic Experts Group, un comité de expertos del ISO/CCITT, que lo lanzó en 1992.

El algoritmo presentado se basa en las limitaciones del sistema visual humano que utiliza para reducir la cantidad de información, por lo que no tiene que ser codificada de forma precisa.

1.5.2 BRILLO Y CONTRASTE

El contraste se define como la diferencia relativa en la intensidad entre un punto de una imagen y sus alrededores.

El brillo consiste en la cantidad de fotones que llegaron al pixel del sensor CCD/CMOS.

1.5.3 BALANCE DE BLANCOS [32]

El balance de blancos es un procesamiento interno de la cámara que sirve para ajustar el brillo de los colores básicos rojo, verde y azul (RGB) que establece el color de referencia de la imagen que aparece como color blanco.

El Balance de Blancos es un proceso interno de la cámara que remueve los tintes indeseables de la fotografía de tal manera que los objetos que aparecen blancos en persona son representados como blancos en la fotografía.

Un correcto balance de blancos tiene que tomar en cuenta la temperatura del color de la fuente de luz. La temperatura de color se refiere a la distribución de colores en una imagen dependiendo de la energía radiante de un cuerpo negro a diferentes condiciones de luz. En Figura 1.22 se observa la curva de distribución de colores en diferentes balances de blancos vs longitud de onda a diferentes temperaturas de color.

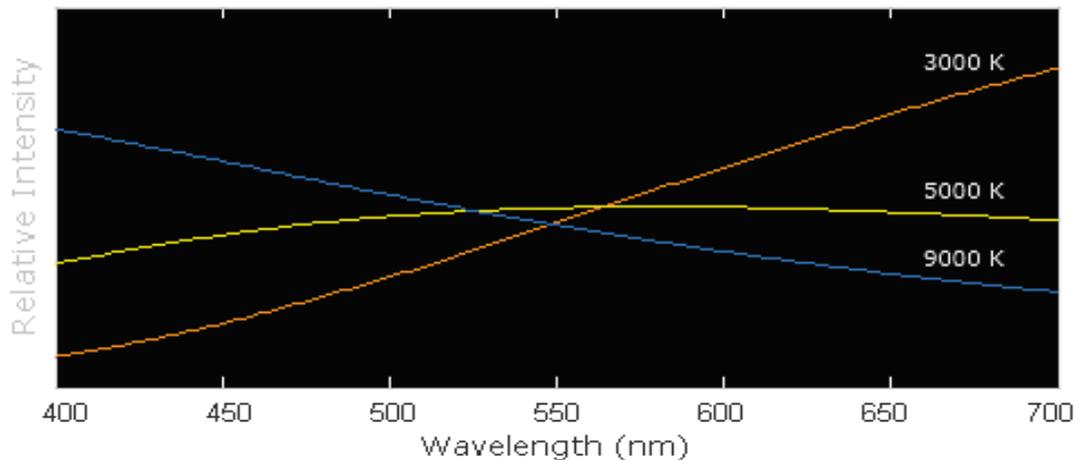


Figura 0.22.- Curva de distribución de colores vs longitudes de onda a diferentes temperaturas de color, tomado de [32]

Nuestros ojos son muy buenos identificando lo que es blanco en diferentes condiciones de luz pero las cámaras tienen muchas dificultades con la identificación automática de blancos, es por esto que muchas cámaras tienen opciones predefinidas de balance de blancos según la fuente de luz y también poseen la opción de que el usuario escoja el color del objeto que desea que la cámara entienda como blanco. De esta manera existen objetos de referencia como cartulinas de un color específico para realizar el ajuste personalizado de blancos.

En Figura 1.23 se muestra los patrones de referencia de color para balance de blancos y el efecto del mismo sobre una fotografía.



Figura 0.23.- Efecto del balance de blancos sobre una imagen, tomado de [32]

1.5.4 CORRECCIÓN DE GAMMA

La corrección gamma es un procesamiento no lineal que se usa para codificar y decodificar luminancia, es necesaria para compensar ciertas propiedades de la visión humana, con el fin de maximizar el ancho de banda en bits relativo a cómo el ser humano percibe la luz y el color. [35]

La corrección de gamma se ha utilizado en todos los dispositivos que presenten una imagen a color, un ejemplo es la corrección usada en los monitores CRT que se presenta en la Figura 1.24

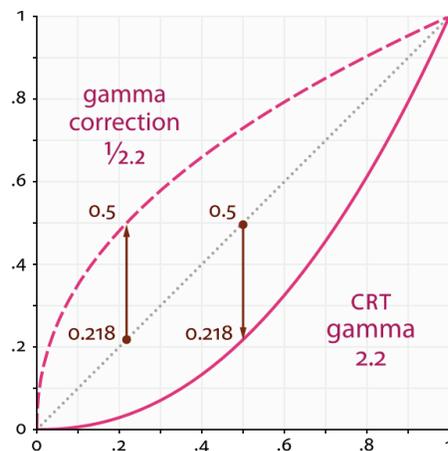


Figura 0.24.- Corrección de Gamma en un tubo de rayos catódicos, tomado de [35]

1.5.5 VIGNETTING

El *Vignetting* es la aparición de bordes negros en las fotografías. El efecto se produce en ocasiones en las que el campo de visión del objetivo se ve afectado por la interposición de elementos que afectan al ángulo de visión.

1.5.6 CORRECCIÓN POR DISTORSIÓN DE LENTE

La distorsión de la imagen se ve afectada por dos principales factores los cuales son la distorsión de lente y la distorsión de perspectiva, éstas generan en la imagen anomalías, las cuales son corregibles usando un software computacional.

Existen tres tipos de distorsiones más conocidas que son generadas principalmente por el lente, estas son la distorsión de barril, la distorsión de cojín y la distorsión compleja. [36]

1.5.6.1 Distorsión de Barril

Toda cámara usa un lente para poder enfocar la luz, es decir acumular los fotones en el sensor, pero el lente al ser curvo genera una distorsión de la imagen, por lo que las líneas rectas no son obtenidas como tal y tiene una curvatura. En la Figura 1.25 se muestra este efecto.

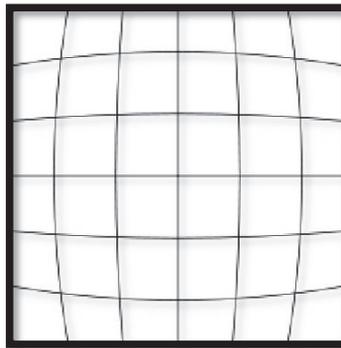


Figura 0.25.- Distorsión de Barril, tomado de [36]

1.5.6.2 Distorsión de Cojín

Esta distorsión es la más común y se generan en distancias focales de corta distancia. Esta se distingue por el abombamiento de la imagen las cuales posee líneas que están en los extremos, estas salen hacia la parte de afuera, como muestra la Figura 1.26.

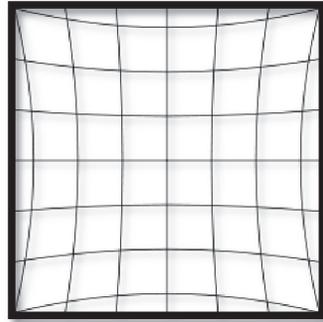


Figura 0.26.- Distorsión de Cojín, tomado de [36]

Este efecto se ve habitualmente en paisajes, en especial con los cambios de figuras es decir de líneas rectas con curvas.

1.5.6.3 Distorsión Compleja

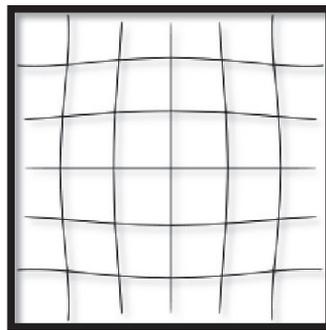


Figura 0.27.- Distorsión Compleja, tomado de [36]

Este tipo de distorsión es una mezcla entre las dos anteriores y su efecto consiste en que a lo largo de las líneas paralelas a los extremos del encuadre se dará distorsión de barril en la zona central y de cojín en las exteriores; dando lugar a una forma que recuerda a un bigote que se muestra en la Figura 1.27. Generalmente se presenta en distancias focales muy bajas.

1.5.6.4 Distorsión de Perspectiva

Como el nombre lo describe esta distorsión depende de la posición del observador siendo un factor fundamental la distancia en la que se encuentra con el objetivo, para definirlo de mejor manera. “La distorsión de perspectiva es la transformación que sufre un objeto y su entorno circundante debido a la proximidad del mismo respecto al objetivo.” [37]

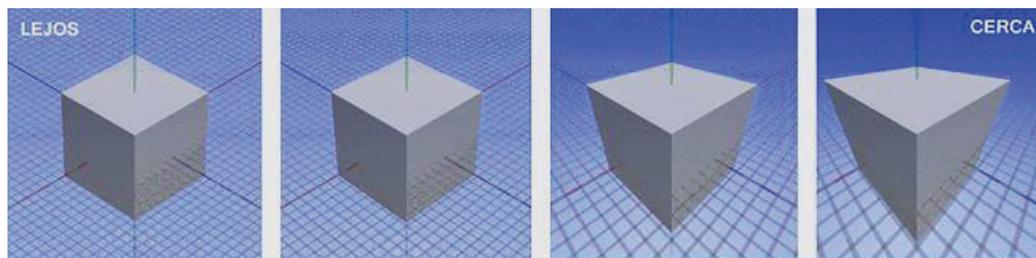


Figura 0.28.- Distorsión de Perspectiva, tomado de [37]

En la Figura 1.28 se puede apreciar que los cubos cambian según nos acercamos esto da la impresión de estar menos deformado y solo es el efecto de la cámara que se acercó al objeto.

1.6 FILTROS ÓPTICOS

1.6.1 DEFINICIÓN

Un filtro óptico es un dispositivo que selectivamente permite el paso de luz con ciertas propiedades, específicamente longitudes de onda, suprimiendo o atenuando la luz restante. Los filtros ópticos más comunes son los filtros de color, es decir, aquellos que sólo dejan pasar luz de una determinada longitud de onda. Si se limitan a atenuar la luz uniformemente en todo el rango de frecuencias se denominan filtros de densidad neutra.

Según su procedimiento de acción pueden ser de absorción, si absorben parte de la luz, o bien reflectivos si la reflejan. A este último grupo pertenecen los filtros dicróicos. Los usos de los filtros ópticos incluyen la fotografía, iluminación y numerosos usos científicos.

La atenuación de la señal filtrada se mide mediante la transmitancia óptica del medio filtrante o su inversa, la absorbancia.

1.6.1.1 Transmitancia

La transmitancia óptica que se define como la fracción de luz incidente, a una longitud de onda especificada, que pasa a través de una muestra.

Su expresión matemática es:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (1.7)$$

Donde I_0 es la intensidad del rayo incidente, e I es la intensidad de la luz que viene de la muestra.

La transmitancia de una muestra está normalmente dada porcentualmente, definida como:

$$T\% = \frac{I}{I_0} * 100\% \quad (1.8)$$

1.6.1.2 Absorbancia

La absorbancia (también llamado densidad óptica) de un material es la relación logarítmica de la radiación que choca con el material y la radiación transmitida a través del material.

1.6.2 TIPOS DE FILTROS

1.6.2.1 Filtro Pasa Banda

Estos filtros dejan pasar de forma selectiva los rangos de longitudes de onda deseados correspondientes a las frecuencias inferior y superior de corte, en la Figura 1.29 se pueden observar estos filtros.

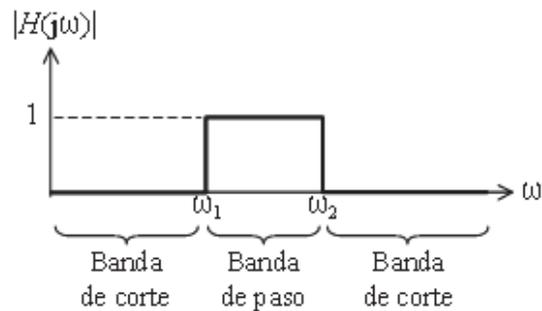


Figura 0.29.- Filtro Pasa Banda, tomado de [38]

1.6.2.2 Filtro Pasa Bajo

Son filtros que bloquean los rangos de longitudes de onda inferiores a la frecuencia de corte; en la Figura 1.30 se puede observar un filtro ideal pasa bajo.

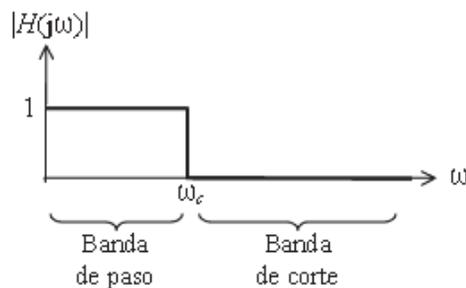


Figura 0.30.- Filtro Pasa Bajo, tomado de [38]

1.6.2.3 Filtro Pasa Alto

Estos filtros bloquean los rangos de longitudes de onda inferiores a los de frecuencia de corte; en la Figura 1.31 se puede observar este filtro.

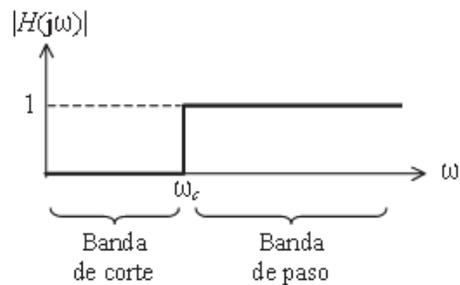


Figura 0.31.- Filtro Pasa Alto, tomado de [38]

1.6.2.4 Filtro Neutro

Son filtros que presentan una transparencia prácticamente constante en particular dentro del espectro visible, es decir atenúan la luz.

1.7 TELEOPERACIÓN

1.7.1 DEFINICIÓN

La teleoperación es un conjunto de tecnologías que comprenden la operación o gobierno a distancia de un dispositivo por un ser humano.

En los dispositivos teleoperados las tareas de percepción del entorno, planificación y manipulación compleja son realizadas por humanos, es decir, el operador actúa en tiempo real cerrando un bucle de control de alto nivel. Los sistemas evolucionados suministran al operador realimentación sensorial del entorno (imágenes, fuerza, distancia).

1.7.2 ELEMENTOS DE LA TELEOPERACIÓN

Las limitaciones de los sistemas teleoperados radican en la capacidad de procesamiento de las señales y la coordinación hombre-robot. Es importante mencionar que el retraso de transmisión de información juega un papel importante y debe tomarse en cuenta en el diseño del sistema de control. El diseño de la interfaz hombre-máquina suele ser crítico. Por lo cual normalmente recae en el

operador las tareas de toma de decisiones en base a la información sensorial, experiencia y habilidad.

Los sistemas de teleoperación están constituidos, en general, por dos manipuladores (uno local y otro remoto), un canal de comunicación, el medio ambiente con el que interactúa el robot remoto, y el operador humano. Los manipuladores están parcialmente controlados por el operador humano y por sus propios algoritmos de control local, en una estructura de control compartido.

Por lo tanto, un sistema de teleoperación se compone básicamente de un robot maestro gobernado por un operador y un robot remoto, o esclavo, cuyo cometido es interactuar con el entorno de una manera que resulte útil en el desempeño de tareas concretas. Normalmente existe un lazo interno de realimentación que hace que los robots se comporten de manera lineal, estableciendo un algoritmo de control que permita conseguir el mayor grado posible de telepresencia, es decir que permita al operador realizar tareas con tanta destreza como si manipulara directamente el entorno.

Un sistema de teleoperación consta de los siguientes elementos, como se muestra en la Figura 1.32:

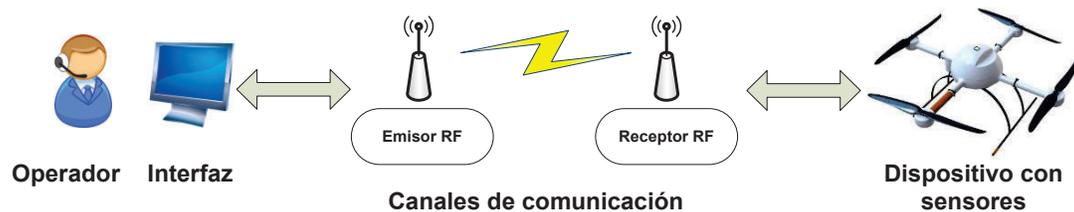


Figura 0.32.- Sistema de teleoperación

- **Operador o teleoperador:** es un ser humano que realiza, a distancia el control de la operación. Su acción puede ir desde un control continuo

hasta una intervención intermitente, con la que únicamente se ocupa de monitorizar, indicar objetivos y planes cada cierto tiempo.

- **Dispositivo teleoperado:** podrá ser un manipulador, un robot, un vehículo o dispositivo similar. Es la máquina que trabaja en la zona remota y que está siendo controlada por el operador.

- **Interfaz:** conjunto de dispositivos que permiten la interacción del operador con el sistema de teleoperación. Se considera al manipulador maestro como parte del interfaz, así como a los monitores de vídeo, o cualquier otro dispositivo que permita al operador mandar información al sistema y recibir información del mismo.

- **Control y canales comunicación:** conjunto de dispositivos que modulan, transmiten y adaptan el conjunto de señales que se transmiten entre la zona remota y la local.

- **Sensores:** conjunto de dispositivos que recogen la información, tanto de la zona local como de la zona remota, para ser utilizada por el interfaz y el control.

1.7.2.1 Estabilidad

La estabilidad es un concepto común y es una condición indispensable para los sistemas teleoperados, ya que, sería inaceptable que durante el manejo del sistema por parte del operador alguno de los dispositivos presente respuestas aleatorias. El ruido eléctrico y los retrasos en las señales de comunicación provocan inestabilidad, el ruido es un síntoma común en cualquier sistema de control real, pero los retrasos sólo se encuentran cuando el robot está muy alejado del control.

1.7.2.2 Transparencia

El concepto de transparencia es mucho más específico que el concepto de teleoperación. Para que las labores realizadas mediante el esclavo sean precisas no es suficiente con un control de la posición del esclavo, sino que además es necesario que el operador sea capaz de percibir otras variables que aparecen sobre el robot remoto durante la teleoperación, haciendo referencia a lo que se conoce como interfaces hápticas (que permiten sensaciones no visuales y no auditivas).

1.8 SISTEMAS DE ESTABILIZACIÓN Y POSICIONAMIENTO

1.8.1 DEFINICIÓN

Los sistemas actuales de posicionamiento y estabilización utilizan un control independiente utilizando sensores referenciados a tierra y actuadores para realizar los movimientos necesarios para cumplir su objetivo.

1.8.2 SISTEMAS DE COORDENADAS U ORIENTACIÓN

Un sistema de coordenadas es un sistema de referencia que permite localizar inequívocamente una posición cualquiera en un espacio dimensional. Para poder desarrollar un sistema de navegación inercial (INS) se necesita hacer cambios de coordenadas las cuales se describen a continuación.

1.8.2.1 Sistema de Coordenadas Inercial Verdadera

En el sistema de coordenadas inercial, las leyes de Newton son válidas, debido a que Newton asumía que su sistema de coordenadas no tenía movimiento. Newton consideraba que el campo inercial era fijo con respecto a las estrellas, de esta manera sus leyes de movimiento solo son válidas en este sistema de coordenadas. El sistema de coordenadas inercial no es un sistema de coordenadas práctico.

1.8.2.2 Ángulos de Euler como Componentes de Actitud [39]

- **Actitud y Orientación**

Esta variable refleja la orientación del vehículo respecto al plano horizontal y el rumbo, permite conocer la orientación del vehículo respecto al norte magnético, a este sistema se lo conoce también como AHRS (Attitude and Heading Reference System).

- **Componentes de Actitud**

Los componentes de actitud están basados en los ángulos de Euler que son un conjunto de 3 coordenadas angulares (θ , Φ , Ψ) que sirven para especificar la orientación de un objeto móvil respecto a un eje de referencia de ejes ortogonales fijos, por este motivo para la representación matemática de la actitud del vehículo se utilizaran los ángulos de Euler [40], siendo así:

$\Theta = \text{pitch}$: Es la relación vertical que existe entre la nariz y el horizonte.

$\Phi = \text{roll}$: Es la cantidad en que la nariz se inclina hacia la izquierda o la derecha.

$\Psi = \text{yaw}$: Es la dirección en que la nariz está apuntando

En la Figura 1.33 se muestra los componentes

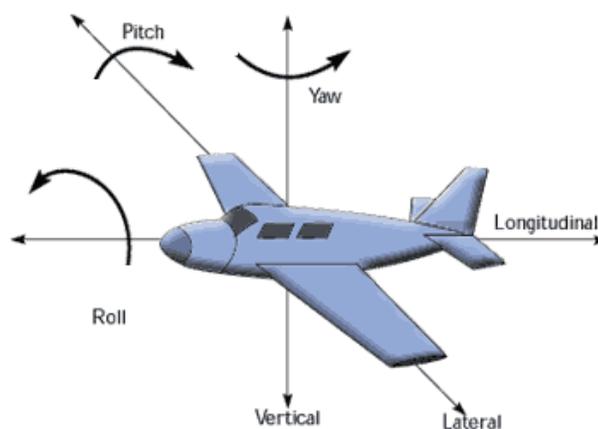


Figura 0.33.- Componentes de actitud, tomado de [39]

1.8.3 TIPOS DE SISTEMAS ESTABILIZACION Y POSICIONAMIENTO

1.8.3.1 *Pan & Tilt*

Los sistemas *Pan&Tilt* pueden rotar alrededor de dos ejes, uno horizontal y otro vertical, así como acercarse o alejarse (zoom) enfocando un área o un objeto de forma manual o automática. Cabe resaltar que el sistema ofrece un posicionamiento certero pero no una estabilización.

1.8.3.2 Sistema de Ejes Flotantes (*Gimballed*) [41]

En esta configuración los sensores inerciales van montado sobre una plataforma que está sujeta a una estructura llamado *gimballed*, como se puede observar en la Figura 1.34, y esta plataforma se encuentra alineada al sistema de coordenadas de navegación.

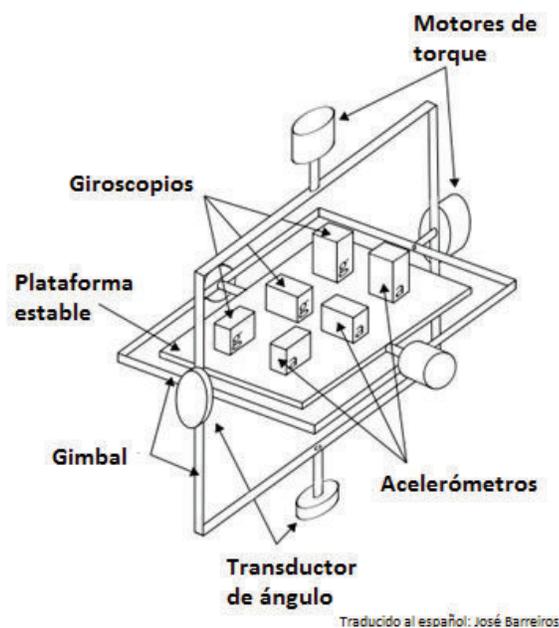


Figura 0.34.- Sistema *Gimballed*, tomado de [41]

Si los giroscopios montados en la plataforma detectan una rotación, esas señales se verán reflejadas en el movimiento de los motores de la estructura *gimballed* con el propósito de mantener estable la plataforma en su sistema de coordenadas. Debido a este acontecimiento en la estructura *gimballed* a esta configuración también se la conoce como “ejes flotantes”.

El sistema de ejes flotantes tiene 2 tipos de referencias:

- Referencia Inercial.- Se aplica en los satélites artificiales cuyo movimiento se desarrolla respecto al centro de masas de la tierra.
- Referencia Terrestre.- Se aplica en vehículos que se desea conocer su desplazamiento relativo a la tierra.

En la Tabla 1.5 se pone a consideración las ventajas y desventajas de un sistema de ejes flotantes.

Tabla 0.5.- Ventajas y desventajas de un sistema de ejes flotante Gimballled.

<i>Gimballled</i>	
Ventaja	Desventaja
Para la estabilización se realizan cálculos simples porque solo se necesita tener las tres componentes de la aceleración.	La mecánica del dispositivo es compleja debido a la regulación de la plataforma.
Respuesta del sistema rápida respecto a los sistemas tradicionales.	Mayor uso de potencia utilizada para los motores.
Mayor exactitud en la posición espacial.	Sistema complejo de programación y control de los motores.

1.8.4 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE EJES FLOTANTES

1.8.4.1 Unidad de Medidas Inerciales [42]

Es un dispositivo que está compuesto por sensores inerciales (acelerómetros y giroscopios), circuitos electrónicos y una CPU, para entregar medidas de

aceleración y velocidad angular. Todos los sensores se encuentran debidamente calibrados y compensados.

La IMU en general es un componente de un Sistema de Navegación por lo cual se suele ocupar otros componentes para corregir las limitaciones de la misma, por ejemplo se utiliza magnetómetro para corregir la orientación.

1.8.4.1.1 Acelerómetro

El principio de un acelerómetro depende de un sistema de masas y resortes donde la tensión y la fuerza de los resortes esta descrita por la ley de Hooke: “La fuerza de resistencia o la fuerza para establecer la posición de equilibrio en un resorte, es proporcional a la cantidad de fuerza al estirarlo o comprimirlo.”

En la Figura 1.35 se puede entender de mejor manera esta ley.

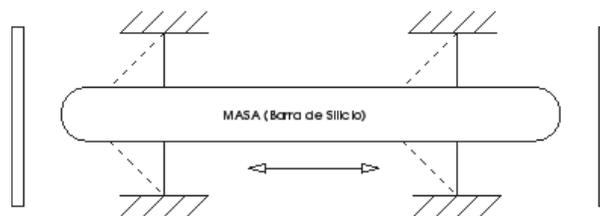


Figura 0.35.- Modelo de un acelerómetro, tomado de [42]

Un acelerómetro mide la componente estática de la aceleración provocada por la gravedad que actúa sobre el vehículo y la componente dinámica de la aceleración que se produce por el movimiento del vehículo. La unidad de medida del acelerómetro se da en g ($1g=9.8 \text{ m/s}^2$).

1.8.4.1.2 Giroscopio

El principio de funcionamiento de un giroscopio está basado en la conservación del momento angular, En la Figura 1.36 se muestra el funcionamiento de un giroscopio.

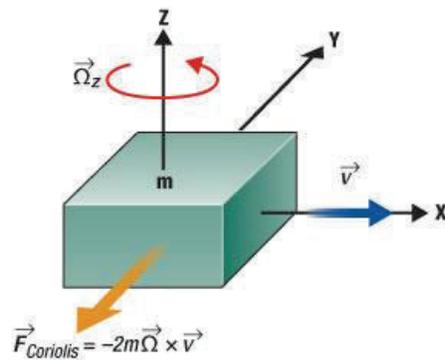


Figura 0.36.- Funcionamiento de un giroscopio, tomado de [42]

Donde m es la masa, Ω es la velocidad angular y v es la velocidad lineal, esta fuerza es transformada en una señal eléctrica proporcional a ella. Un giroscopio mide la velocidad angular de un vehículo en dps (grados por segundo, por sus siglas en ingles).

1.8.4.2 Actuadores

1.8.4.2.1 Motor Brushless [43]

Los motores *Brushless* son muy similares a los motores de inducción de corriente alterna (AC), tanto constructivamente como en el principio de funcionamiento; siendo la principal diferencia la estructura del rotor.

Este motor está compuesto por un estator y por un rotor. El estator esta hecho de hierro laminado y ranurado, este lleva las bobinas, que puede conectar de dos maneras: conexión delta o conexión estrella.

La ventaja del estator bobinado es que se tiene 2 posibilidades de conexión, la primera conexión en estrella para un alto torque a bajas revoluciones y la conexión delta brinda un bajo torque y baja revoluciones, en esta configuración utiliza la mitad del voltaje aplicado a las bobinas pero aumenta la corriente y por consiente aumenta las perdidas por resistencia.

Es por esto que generalmente viene conectado en conexión estrella, como se muestra en la Figura 1.37.

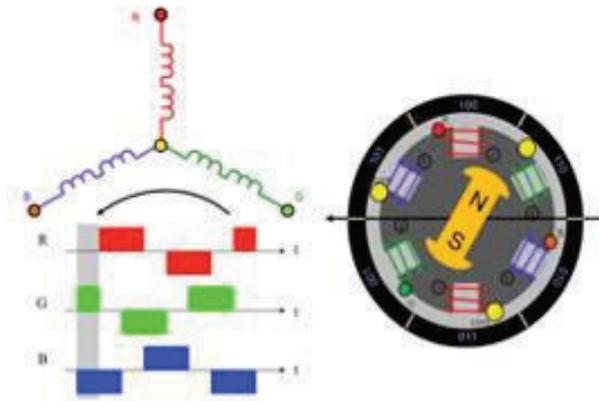


Figura 0.37.- Funcionamiento motor Brushless, tomado de [42]

El rotor contiene de imanes permanentes, el número de polos afecta directamente al torque e inversamente a la velocidad, como lo haría a un motor de inducción de AC.

El principio de funcionamiento es el mismo que del motor de inducción AC por lo que se envía 3 ondas sinusoidales desfasadas 180 grados entre cada una, para ello se necesita una tarjeta de control con actuadores que se activen y desactiven según la forma de onda.

Las técnicas de control de un motor como este pueden ser 3: control trapezoidal, sinusoidal, control vectorial.

La técnica más utilizada en una aplicación de estabilización es la sinusoidal debido a su exactitud a bajas velocidades y su bajo consumo de recursos.

Esta técnica se consigue alimentando a las 3 bobinas con una corriente sinusoidal desfasada 120 grados, para esto se utiliza la técnica de conmutación SPWM, la cual genera pulsos DC con una buena aproximación AC a la de una senoide. En la Figura 1.38 podemos observar las conmutaciones a cada motor.

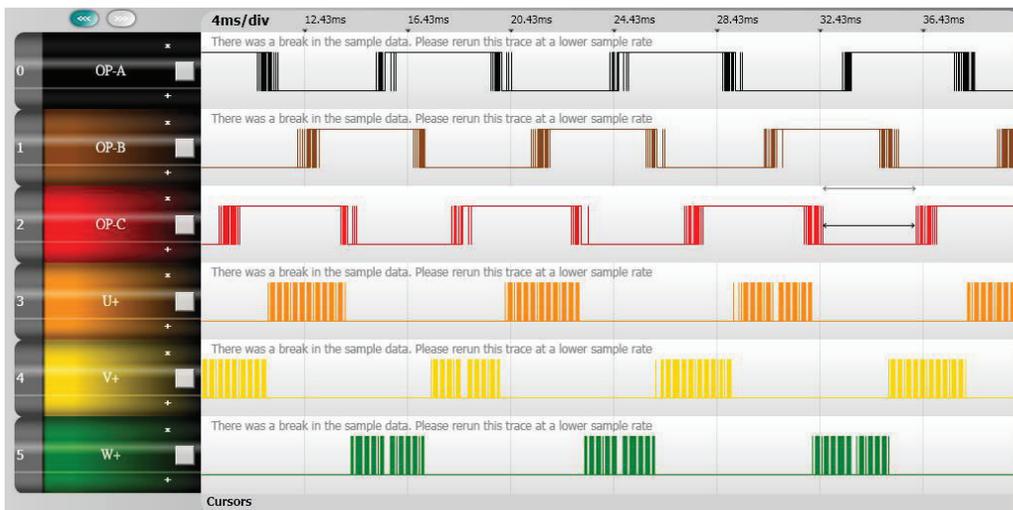


Figura 0.38.- Formas de onda de Control motor brushless, tomado de [42]

1.9 SISTEMAS DE CONTROL DISCRETO

1.9.1 DEFINICIÓN

Los sistemas de control de tiempo discreto (STD) son sistemas dinámicos para los cuales una o más de sus variables solamente son conocidas en ciertos instantes.

Por lo tanto, son aquellos que manejan señales discretas, a diferencia de los sistemas de tiempo continuo (STC) en los cuales sus variables son conocidas en todo momento.

Partiendo de esta definición se establece que todo sistema que incluye un computador digital en el bucle de control para realizar un procesamiento de señal se lo considera como un sistema de control discreto

1.9.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL DISCRETO

Los sistemas de control discreto con realimentación poseen los siguientes bloques que se muestran en las Figuras 1.39 y 1.40:

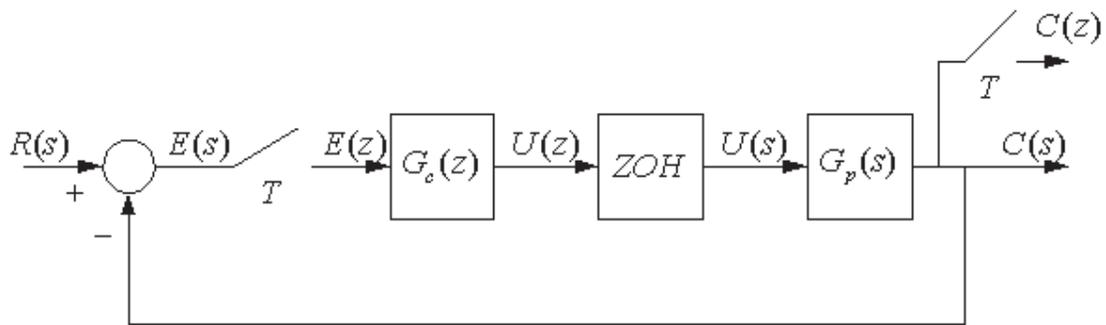


Figura 0.39.- Diagrama Bloques de un Sistema de Control Discreto, tomado de [44]

Donde T es el periodo de muestreo del sistema, $G_c(z)$ es el controlador digital, ZOH (Zero Order Hold) es un reconstructor de señal de orden cero y $G_p(s)$ representa a la planta en tiempo continuo.

Generalizando el Sistema de Control Discreto sobre un Computador Digital se obtiene el siguiente diagrama de bloques:

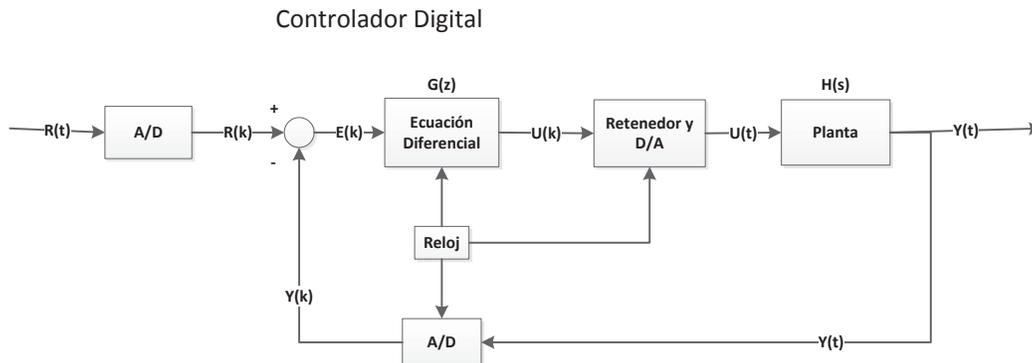


Figura 0.40.- Bloques de un sistema de Control Discreto, tomado de [44]

1.9.3 TIPOS DE CONTROLADORES [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50]

Es posible diseñar varios tipos de controladores como: Redes de adelanto, atraso, PID, IMC, entre otros, tanto directamente en el dominio discreto (z) como indirectamente en el dominio del tiempo (s) y, posteriormente, transformarlas al dominio de z .

A continuación se exponen los dos principales tipos métodos de diseño de controladores discretos puestos a consideración en el presente trabajo.

1.9.3.1 PID

Un PID es un algoritmo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos:

- Proporcional:** Determina la reacción ante el error actual.
Integral: Genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que se llegara a obtener un error en estado estable de 0.
Derivativo: Determina el tiempo de reacción en el que el error se produce.

Una de las características de PID es que no se requiere conocer el modelo de la planta para su implementación, ya que al ser sintonizable se puede adaptar a las características de cada planta.

A continuación se muestra la expresión general de un PID en tiempo continuo (1.9) y discreto (1.10) y, en la Figura 1.41 se muestra los diagramas de bloques en cada caso.

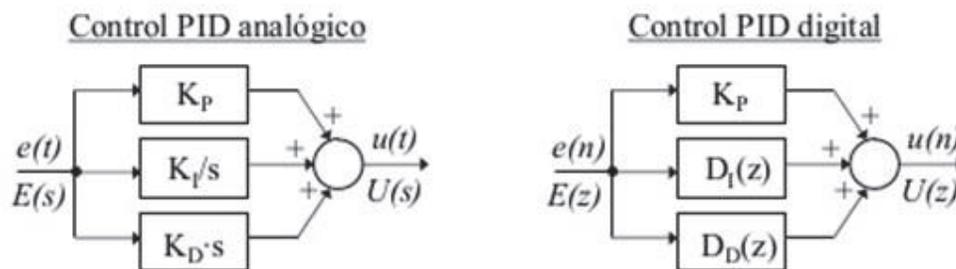


Figura 0.41.- Diagrama de bloques de un PID continuo (izq.). Diagrama de flujo de PID discreto (der.), tomado de [45]

$$U(s) = K_p E(s) + K_i \frac{E(s)}{s} + K_d s E(s) \quad (1.9)$$

$$U(z) = K_p E(z) + D_i(z) E(z) + D_d(z) E(z) \quad (1.10)$$

Donde:

$e(t)$: Error

$E(z)$: Error

$U(z)$: Salida del Controlador

K_p : Constante proporcional

D_i : Controlador Integral Discreto

D_d : Controlador Derivativo Discreto

$u(t)$: Salida del Controlador
 K_p : Constante proporcional
 K_i : Constante Integral
 K_d : Constante Derivativa

Existes varias maneras para implementar un controlador PID digital:

1.9.3.1.1 Aproximación Rectangular

El diseño se realiza en el dominio analógico y se transfiere al dominio discreto.

Se usa la suma de los errores para obtener la integral, en la Figura 1.42 se muestra para su mejor entendimiento.

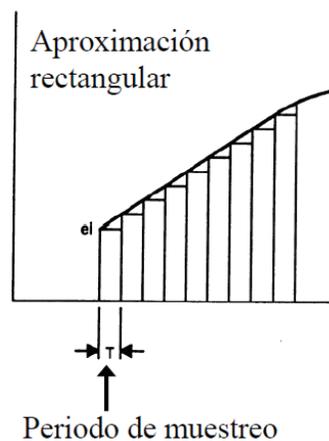


Figura 0.42.- Aproximación rectangular a la integral, tomado de [47]

Término proporcional (1.11)

$$K_p e(t) = K_p e(n) \quad (1.11)$$

Término integral (1.12)

$$K_i \int e(t) = K_i T \sum_i e_i \quad (1.12)$$

Término derivativo (1.13)

$$K_d \frac{e(t)}{dt} = K_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T} \quad (1.13)$$

De esta aproximación se derivan (1.14) y (1.15):

Algoritmo de posición

$$u(n) = K_p e(n) + K_i T \sum_i e_i + K_d [e(n) - e(n-1)] / T \quad (1.14)$$

El algoritmo de posición (10) tiene la dificultad que puede desbordar el error por malfuncionamiento y evitar que el computador calcule correctamente la salida.

Algoritmo de velocidad

$$u(n) = u(n) - u(n-2) \quad (1.15)$$

El algoritmo de velocidad (Ec.1.15) presenta mejor respuesta en el arranque y a transitorios por lo que es el algoritmo usado habitualmente.

1.9.3.1.2 Aproximación Trapezoidal

El diseño se realiza en el dominio discreto usando técnicas de ubicación de polos. Se usa la aproximación trapezoidal para obtener la integral, en la Figura 1.43 se muestra aproximación.

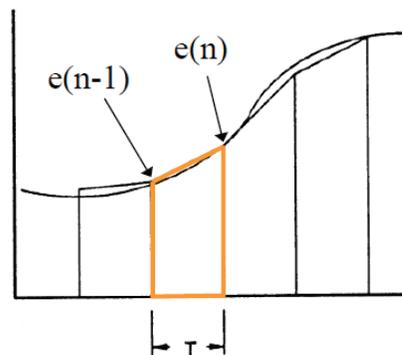


Figura 0.43.- Aproximación trapezoidal a la integral, tomado de [48]

En (1.16) se muestra la ecuación en diferencia para un PID mediante aproximación trapezoidal

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_p + K_i \frac{T(1+z^{-1})}{2(1-z^{-1})} + \frac{K_d}{T} (1 - z^{-1}) \quad (1.16)$$

Esta aproximación se usa cuando se requiere mayor precisión en la conversión discreta.

1.9.3.2 IMC

El IMC (Control con Modelo Interno) es diseñado en base al modelo de la planta, su filosofía recae en el principio de modelo interno: Un control preciso puede ser alcanzado solo si el sistema de control encapsula alguna representación explícita o implícita del proceso a ser controlado.

El IMC presenta el siguiente esquema generalizado en la Figura 1.44:

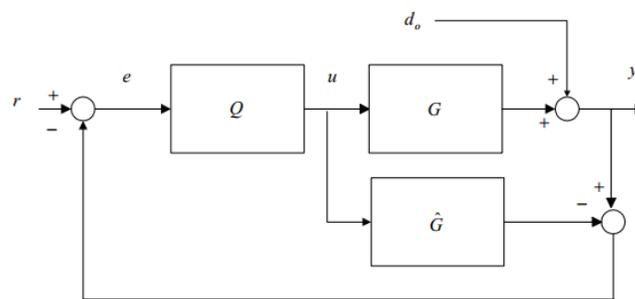


Figura 0.44.- Diagrama de bloques del controlador IMC, tomado de [50]

Donde:

$G(s)$: es la planta

$\hat{G}(s)$: es el modelo de la planta

Q : es el bloque de sintonización del controlador

$d(s)$ se lo puede considerar como la diferencia entre la planta y su modelo

La salida $Y(s)$ se puede expresar como (1.17):

$$y = \frac{QG}{1+Q(G-\hat{G})}r + \frac{1-Q\hat{G}}{1+Q(G-\hat{G})}d_0 \quad (1.17)$$

Si el modelo es perfecto se tiene (1.18):

$$y = QGr + (1 - Q\hat{G})d_0 \quad (1.18)$$

El IMC ofrece algunos beneficios frente al modelo clásico de realimentación:

- No se necesita examinar las raíces polinomiales de $1+C(s)G(s)$

- Se puede diseñar el controlador con el solo conocimiento de la planta más no de su comportamiento.

El IMC tiene algunos problemas como:

- El modelo nunca es perfecto, por lo tanto no se lograría nunca un control perfecto
- Los retardos del modelo no se pueden invertir de manera exacta
- Es posible que los actuadores se saturen

1.10 MICROCONTROLADOR

El microcontrolador es un circuito integrado programable que ejecuta instrucciones que están registradas en su memoria interna. Está compuesto por tres partes principales la unidad de procesamiento, memoria y los periféricos de entrada y salida.

La principal ventaja al utilizar un microcontrolador es su bajo consumo y el procesamiento de instrucciones a alta velocidad, esta depende directamente del cristal que lleve colocado.

1.10.1 FAMILIA ARM CORTEX M

Los microcontroladores ARM utilizan una arquitectura RISC (Reduce Instruction Set Computer) son desarrollados por ARM Holdings. La familia ARM trabaja con 32 bits para todos los procesamientos esto presenta una gran ventaja respecto a otras familias de microcontroladores debido a que son de un número menor 8 bits o 16 bits.

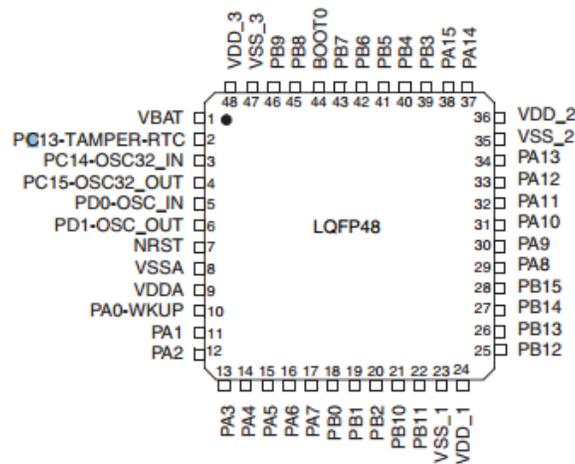


Figura 0.45.- Encapsulado STM32F103, tomado de [51]

El microcontrolador utilizado es un STM32F103 el cual es manufacturado por STMicroelectronics, entre sus principales características para es la velocidad de su reloj interno la cual es de 72MHz; esto se debe a que posee un multiplicador de velocidad además de constar con protocolos de comunicación independientes de USART SPI SWD, este último utilizado para realizar un depurado a tiempo real con la computadora, en la Figura 45 se muestra el diagrama con el pinout del microcontrolador.

Especificaciones

Encapsulado LQFP de 36 pines. Contiene un núcleo ARM Cortex-M1 con FPU (unidad de punto flotante).

- 1 MByte de memoria flash
- 192kBytes de RAM
- Oscilador RC
- Alimentación por una sola fuente de 1.8V a 3.6V
- Puede operar a una velocidad de 72MHz
- Pines I / O multiplexadas con muchos periféricos internos
- USB OTG HS / FS
- Controlador de memoria estática de soporte Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR y NAND.

CAPÍTULO 2

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema controlable de captura de imágenes procesadas mediante NDVI adaptable a una plataforma aérea está construido en base de dispositivos comerciales. Incluye una cámara *Point & Shoot* para la toma de fotografías previamente adaptada para responder en todo el rango de visión de su CCD; para esto se elimina el filtro de bloqueo de infrarrojo y se lo reemplaza con un filtro de gel seleccionado específicamente para esta aplicación. El filtro de gel debe ser capaz de eliminar las bandas no requeridas del espectro para el cálculo del índice NDVI, dicha cámara se encuentra montada sobre un dispositivo de estabilización y posicionamiento llamado *Gimballed*.

El *Gimballed* comercial consta de 3 ejes de estabilización: Pitch, Roll y Yaw sintonizados por un controlador PID configurable por computador y comandado mediante comunicación serial. Se dispone de un microcontrolador que es el responsable de coordinar las funciones del *gimballed*, por otro lado el gestor de comunicación es capaz de comandar el disparo y zoom de la cámara y funciona como interfaz entre el receptor de datos y el controlador del *gimballed* para controlar su posición con comandos provenientes de la estación terrena, la comunicación de datos para los comandos se realiza por protocolo *Zigbee* a una frecuencia de 900MHz y el *streaming* de video por un enlace de radiofrecuencia a 5,8GHz.

Para facilitar el uso por parte del operador se implementó una HMI terrena mediante computador que incluye opciones de procesamiento de imágenes y control de la cámara con visualización en línea de video, para lo cual se usa un conversor de video análogo a digital con salida USB.

El sistema consta de las siguientes características para el diseño de hardware:

- Adaptabilidad física a cualquier plataforma aérea. Incluye características de volumen y peso, sistemas de anclajes, estabilidad.
- Adaptabilidad técnica a cualquier plataforma aérea. Incluye características de voltaje y potencia compatibles, enlaces RF y de datos con frecuencias libres de uso en otras funciones de la plataforma aérea.
- Capacidad de control total desde la estación terrena.
- Sistema modular y económico, usando dispositivos comerciales de fácil configuración y mantenimiento.

En la Figura 2.1 se presenta el diagrama de flujo del sistema a implementarse.

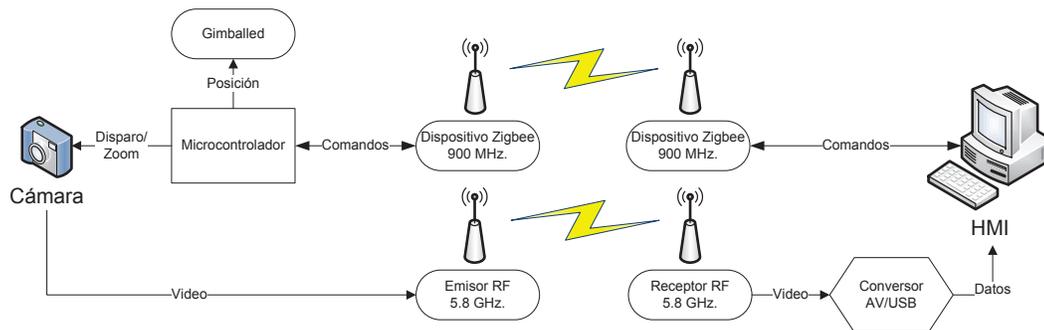


Figura 0.1.- Diagrama de bloques sistema completo

2.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA

2.2.1 CAMARA DIGITAL

2.2.1.1 Selección de la cámara

Los parámetros de selección de la cámara son los siguientes:

- Cámara tipo compacta, peso menor a 500g.
- Firmware programable
- Capacidad de zoom y disparo remoto
- Salida de Video
- Resolución mayor a 10MP
- Enfoque automático

- Fácil montaje y desmontaje del lente y filtros
- Balance de blancos configurable por usuario
- Opción de imagen en formato RAW

Tomando en cuenta las características anteriores se han preseleccionado tres modelos de cámara cuyas características se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 0.1.- Comparativa de cámaras digitales

	Canon PowerShot A2200	Canon SX30IS	Sony DSC-HX50V/B
			
Sensor de Imagen	CCD tipo 1/2, 3. 14.1 MP. Filtro tipo Bayer	CCD tipo 1/2,3. 14.1 MP. Filtro tipo Bayer	1/2.3" Exmor R® CMOS sensor. 20.4 MP. Filtro tipo Bayer RGB
Procesador de imagen	DIGIC 4 con tecnología iSAPS	DIGIC 4 con tecnología iSAPS	Exmor R® CMOS
Objetivo	5 - 20 mm (equivalente en 35 mm: 28 – 112 mm). Zoom de 4x. f/2,8 – f/5,9	4,3 - 150,5 mm (equivalente en 35 mm: 24 - 840 mm). Óptico de 35x. Digital aprox. 4x	4:3: 24-720mm. Óptico de 30x
Enfoque	Tipo TTL Distancia mínima de enfoque: 3cm	Tipo TTL en Servo AF/AE	iAuto: AF
Sensibilidad	AUTO, 80, 100, 200, 400, 800, 1600	AUTO, 80, 100, 200, 400, 800, 1600	Auto/80/100/200/400/800 /1600/3200/6400 *4 /12800 *4

	Canon PowerShot A2200	Canon SX30IS	Sony DSC-HX50V/B
Obturador	1– 1/1600 segundos	15 - 1/3200 seg.	0.00025 seg.
Balance de blancos	Tipo TTL. Modos: Auto, Luz de día, Nublado, Evaluativo.	Tipo TTL. Modos: Auto, Luz de día, Nublado, Tungsteno, Fluorescente, Fluorescente intenso, Evaluativo.	Auto / luz de día / nublado / floreciente 1,2,3 / Incandescente/ Flash / One Push, One Push Set
Tipo de archivo	Compresión JPEG, DPOF, RAW(CHDK)	Compresión JPEG, DPOF, RAW(CHDK)	JPEG
Tarjeta de Memoria	SD, SDHC, SDXC, MMC, MMCplus, HCMMCplus	SD, SDHC, SDXC, MMC, MMCplus, HCMMCplus	MS Duo and SD/SDHC compatible
Batería	Batería recargable de ión-litio. Duración: Aprox. 280 capturas. Aprox. 360 min. de reproducción	Batería recargable de ión-litio. Duración: Aprox. 370 capturas. Aprox. 600 min. de reproducción	Batería recargable de ión-litio.
Características físicas	0 a 40 °C, de 10 a 90% de humedad. 93,2 X 57,2 X 23,6 mm. Aprox. 135 g (batería y tarjeta de memoria)	0 a 40 °C, de 10 a 90% de humedad. 122,9 x 92,4 x 107,7 mm. Aprox. 601 g (batería y tarjeta de memoria incluidas)	108.1 x 63.6 x 38.3mm. Aprox. 272g (batería y tarjeta de memoria incluidas)

	Canon PowerShot A2200	Canon SX30IS	Sony DSC-HX50V/B
	incluidas)		
Firmware	Canon (propietario), CHDK (código abierto)	Canon (propietario), CHDK (código abierto)	Sony (propietario)

De Tabla 2.1 se escoge el modelo de cámara Canon A2200 por presentar las características de hardware adecuadas para el presente trabajo principalmente por la posibilidad de firmware abierto, peso y tamaño reducido.

2.2.1.2 Firmware [52]

Debido a la necesidad de disponer un firmware programable de la cámara que permita el control de zoom y disparo remoto, autoenfoco y la posibilidad de cargar scripts de funciones se ha elegido el *Firmware* de código abierto CHDK (*Canon Hack Development Kit*).

CHDK es un *firmware* no oficial de código abierto, experimental y gratuito para cámaras Canon basadas en los procesadores DIGIC II, III y IV que aporte algunos controles manuales. No sustituye al firmware de la máquina de forma permanente, sino que lo instala en la tarjeta de memoria.

Entre las principales características que añade el uso de CHDK son:

- Fotografía RAW, con RAW *Average*, RAW *Sum*
- Velocidades de disparo desde 1/10,000" hasta 64 segundos
- Exposición personalizada basada en Disparo (TV), basada en la apertura (AV) y basada en la sensibilidad ISO.
- Bloqueo de enfoque

- Ejecución de Scripts escritos en LUA y uBasic con comandos específicos para CHDK
- Motion-detection
- Disparo mediante el puerto USB
- Cuadrícula, corte y alineación
- Indicador de Batería
- Histograma en vivo en RGB y luminancia.
- Video limitado a la tarjeta SD
- Zoom durante el video
- Control de la potencia del flash

2.2.1.3 Acondicionamiento de la Cámara [53] [54] [55]

A fin de disponer de una cámara multiespectral que diferencia el espectro de Infrarrojo cercano y el visible en dos canales diferentes a partir de una cámara comercial es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Eliminar el filtro infrarrojo IR sobre el CCD

Debido a que para esta aplicación es necesario disponer de toda la respuesta espectral del sensor de imagen CCD es necesario eliminar el filtro IR situado sobre el CCD. En la Figura 2.3 se puede ver la respuesta del sensor CCD con el filtro de bloqueo IR, y en la Figura 2.4 la respuesta al extraer el filtro de bloqueo IR.

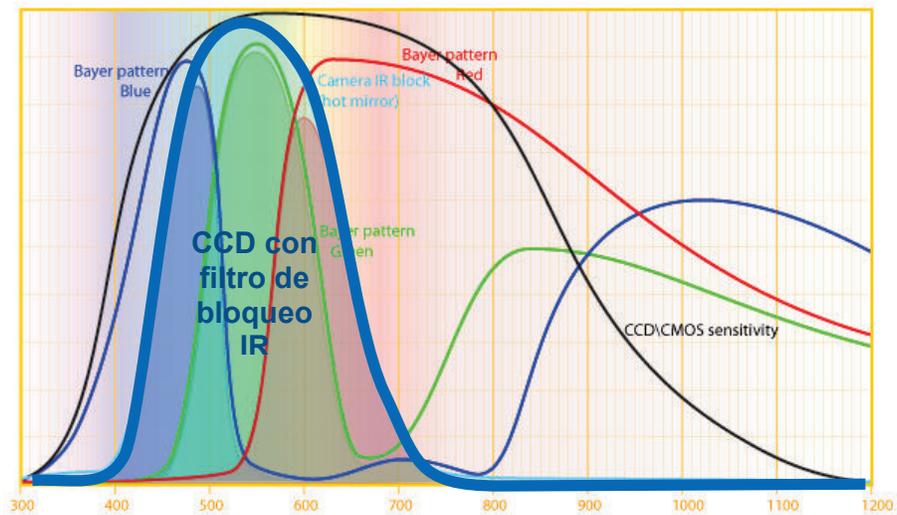


Figura 0.2.- Respuesta del sensor CCD

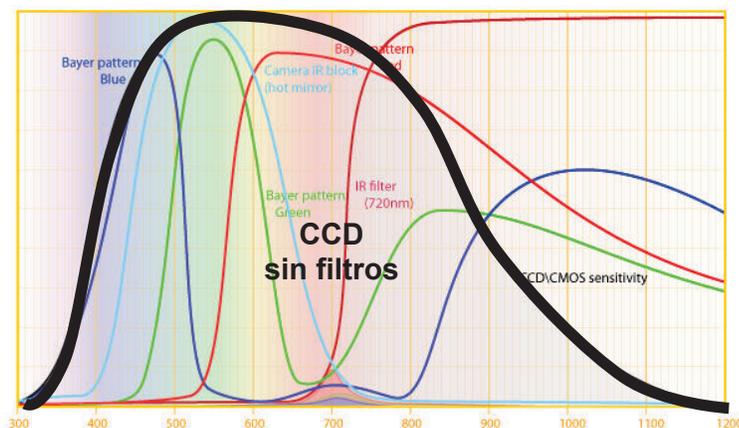


Figura 0.3.- Respuesta del sensor CCD con filtro de Bayer para RGB

2. Verificar la respuesta del sensor de imagen

El proceso de verificación de la respuesta del sensor de imagen se lo hace en el infrarrojo cercano y el visible, debido a que ciertamente todas las cámaras poseen respuestas probadas en el espectro visible se procede a verificar solo el espectro del infrarrojo mediante leds de longitud de onda específica.

A continuación en la Figura 2.5 se muestran las fotografías tomadas con la cámara Canon A2200 sin filtro de bloqueo IR.

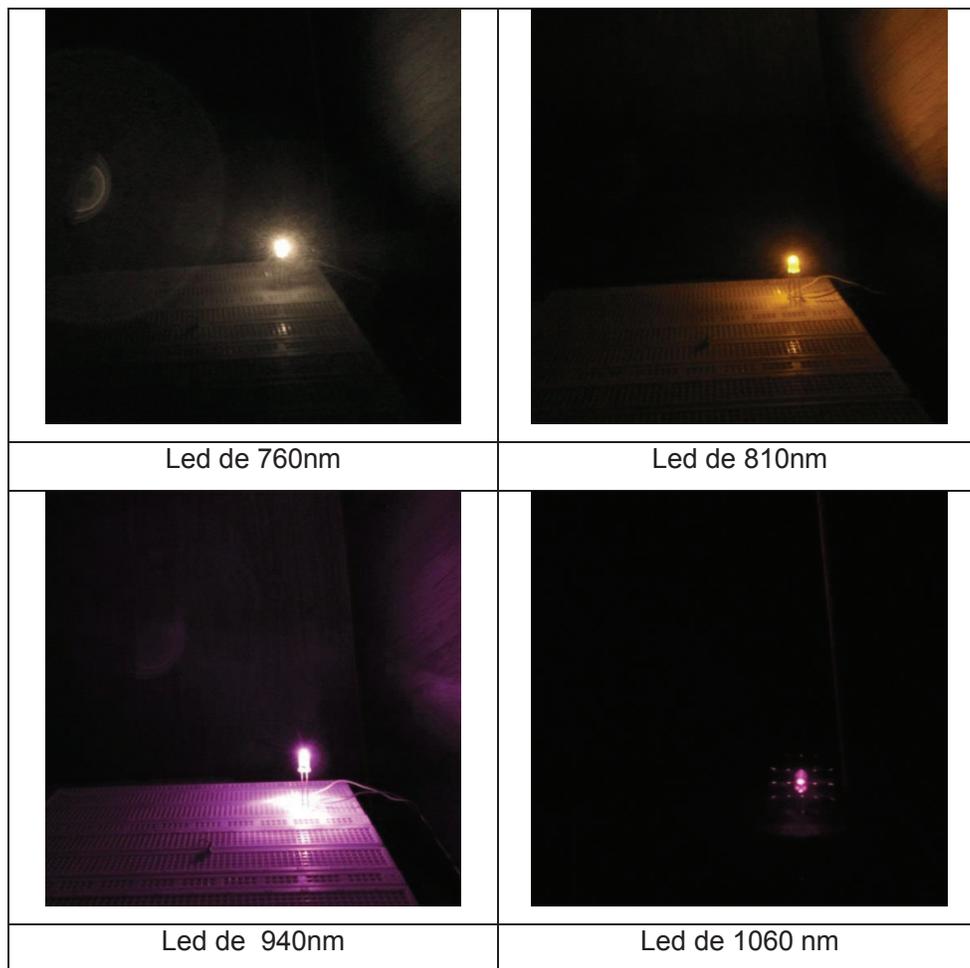


Figura 0.4.- Fotografías obtenidas de la cámara sin filtro con diferentes longitudes de onda

Conclusión: El sensor CCD de la cámara Canon a2200 tiene una respuesta probada en el infrarrojo de al menos hasta 1060 nm.

3. Determinar el filtro adecuado para Infrarrojo Cercano y Visible

Partiendo de los resultados anteriores usando las bandas de Landsat mostradas en la Tabla 2.2, como referencia se establece que el filtro adecuado debe tener la siguiente respuesta, la misma que deja pasar el espectro visible, guardando los datos en el canal B y el espectro NIR guardando dichos datos en el canal R, como se ve en la figura 2.6.

Tabla 0.2.- Bandas utilizadas por el satélite LandSat para NDVI

Ground truth for Landsat satellite	Visible	450-650 nm
	Infrarrojo cercano	750-900 nm

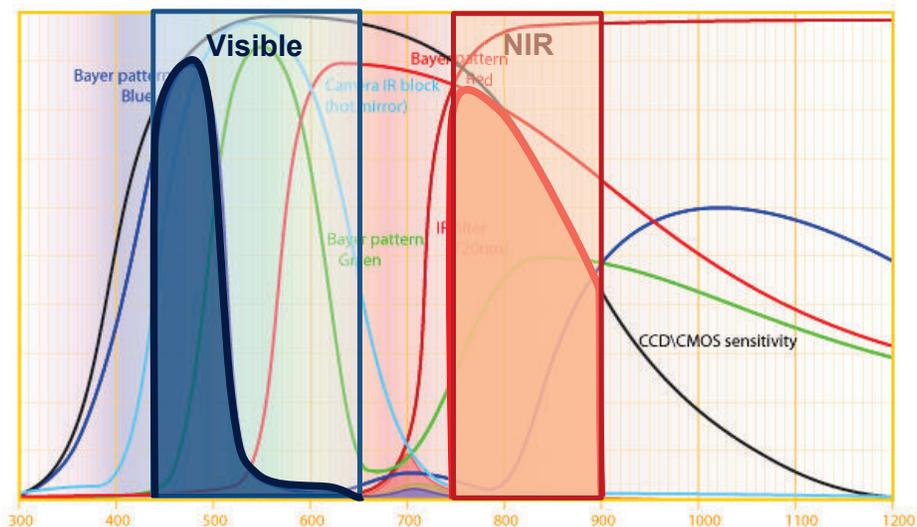


Figura 0.5.- Respuesta espectral esperada para el filtro del CCD

Se determinó el uso de un filtro de gel ROSCO 2007, ya que su respuesta espectral es similar a la esperada en el gráfico anterior, en la Figura 2.7 se muestra la respuesta espectral obtenida en el laboratorio.

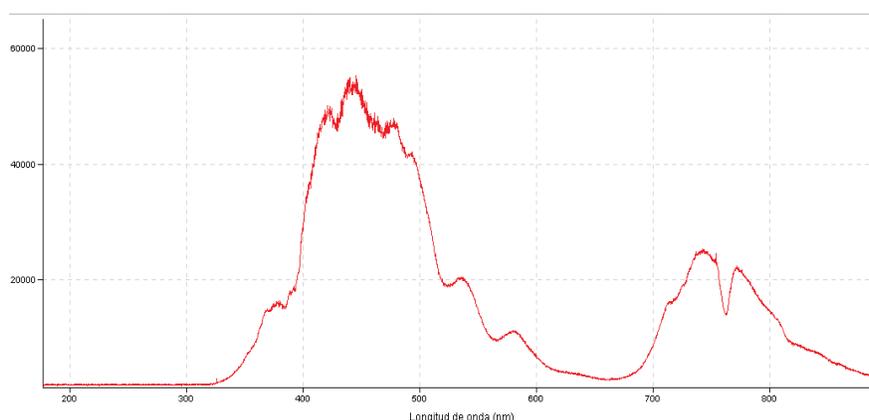


Figura 0.6.- Respuesta Experimental del Filtro ROSCO 2007

Al colocar el filtro en el sensor CCD y mediante el filtro de Bayer se obtiene la onda mostrada en la Figura 2.8, cabe recalcar que tenemos información

espectral no deseada en donde la respuesta del canal Blue se traslapa con la del canal Red por lo que se realiza un proceso de calibración para eliminar esos valores.

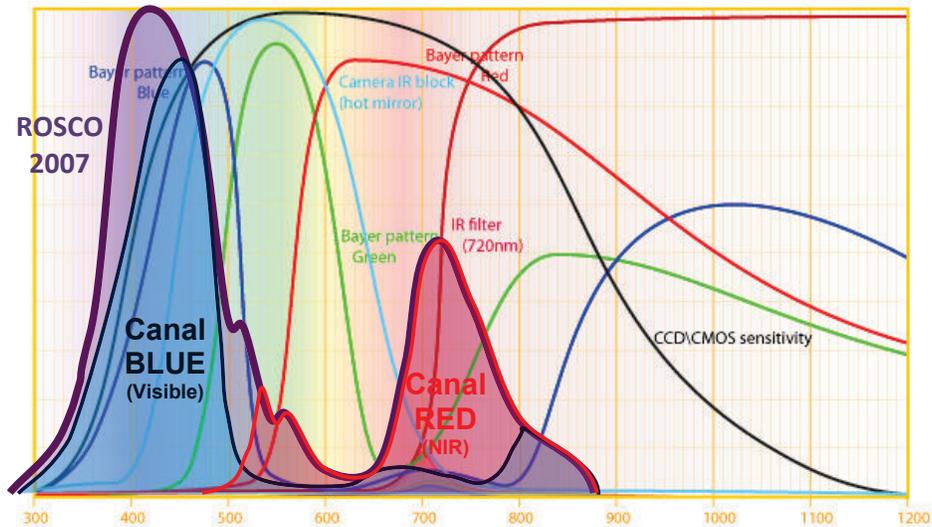


Figura 0.7.- Respuesta RGB del CCD con filtro ROSCO 2007

4. Aplicar el filtro sobre el CCD

Para aplicar el filtro físico es necesario desarmar la cámara y en el espacio donde se encontraba el filtro de bloque IR se coloca el filtro de gel seleccionado, como se muestra en la Figura 2.9.



Figura 0.8.- CCD con filtro Rosco 2008.

2.2.2 GIMBALLED

Los parámetros de selección del sistema de ejes flotantes son los siguientes:

- Peso menor a 700g (para uso en drones)
- Posibilidad de control y estabilización de 3 ejes
- Modular
- Motores *Brushless*
- Sistema para eliminación de micro vibraciones.
- Controlador de código y hardware libre

Tomando en cuenta las características anteriores se ha seleccionado un *gimballed* “USA DYS 3 Axis Gimbal Brushless con controlador evvGC”, que se muestra en la Figura 2.10, esta estructura posee sensores inerciales montados sobre ella. El *gimballed* utilizado está formado por: una estructura de metal y fibra de carbono de tres ejes y 3 motores *brushless* para el movimiento correctivo, una unidad de medición inercial MPU6050 comunicado por I2C a la tarjeta principal, y por último la placa controladora de código abierto EVVCG v1.3.



Figura 0.9.- Gimbal de 3 ejes, tomado de [56]

2.2.2.1 Especificaciones

A continuación en Tabla 2.3 se muestra las especificaciones del Gimbal *USA DYS 3 Axis Gimbal Brushless*.

Tabla 0.3.- Especificaciones técnicas del *Gimbal* , tomado de [56]

Peso del Gimbal	Peso sin motores 400 g.
Peso de cada motor	93 g.
Motores	3 motores Brushless DYS-BGM4108-130T
Controlador	3-axis Brushless Gimbal Controller Board EvvGC Pitch Roll Yaw
Unidad Inercial	MPU6050 seis ejes (Giroscopio y acelerómetro)
Características físicas	<p>Peso 620g (sin batería)</p> <p>Volumen 24 x 23 x 15cm.</p>

2.2.2.2 Unidad Inercial IMU

La unidad inercial usada en el Gimbal *USA DYS 3 Axis Gimbal Brushless* es la MPU 6050, se muestra en la figura 2.11, esta cuenta con un giroscopio con una respuesta programable de +- 250, 500, 1000, 2000 °/sec, y un acelerómetro en los 3 ejes cada uno con una resolución programable de +-2g, 4, 8 y 16g (gravidades), incorporadas en el encapsulado, además la IMU se comunica por I2C, configurado como esclavo a la tarjeta de control.

Para obtener la posición real del dispositivo es necesario realizar un algoritmo avanzado además de utilizar filtros para que la lectura sea correcta.



Figura 0.10.- Tarjeta IMU con MPU6050, tomado de [57]

En tabla 2.4 se presenta una comparativa entre dos modelos adicionales de Unidades Inerciales IMU. Cabe recalcar que la unidad inercial MPU6050 es la única que dispone la salida de datos en formato de ángulos de Euler, lo cual facilita el procesamiento en el controlador EvvGC.

Tabla 0.4.- Comparativa de IMU

	MPU6050	IMU ITG3200/ADXL345	LSM9DS0
			
Ejes	6 o 9 ejes. Datos en formato de matriz de rotación, quaternion, ángulos de Euler y raw.	6 ejes independientes, formato raw. ADXL345 acelerómetro, ITG-3200 giroscopio	9 ejes, formato raw. 3 canales de aceleración, 3 canales de campo magnético, 3 canales de velocidad angular.
Rango	Gyro.: +-250, +-500, +-1000, +-2000 dps. Accel.: +-2, +-4, +-8, +-16 g	Gyro.: +-2000 dps. Accel.: +-2, +-4, +-8, +-16 g	Gyro.: +-245, +-500, +-2000 dps. Accel.: +-2, +-4, +-6, +-8, +-16 g
Interfaz	I2C	I2C	I2C, SPI

	MPU6050	IMU ITG3200/ADXL345	LSM9DS0
Alimentación	2.3-3.4 v	3.3 v	2.4-3.6 v
Costo	\$40.00	\$40.00	\$30.00

2.2.2.3 Tarjeta de control

El control para el estabilizador de ejes flotantes se realiza con la tarjeta EvgGC debido a sus facilidades al ser *open software* y *open hardware*, se muestra en la Figura 2.12. La tarjeta permite la estabilización en los 3 ejes (pitch, roll, yaw) y el posicionamiento en (pitch y roll) mediante una unidad inercial la cual envía los valores de posición espacial. Se ha modificado el código fuente del controlador para que cumpla nuestros requerimientos.

Los cambios realizados son la implementación del control de posición en el eje “yaw” del sistema así como también la función de modificación del setpoint mediante una entrada PWM.

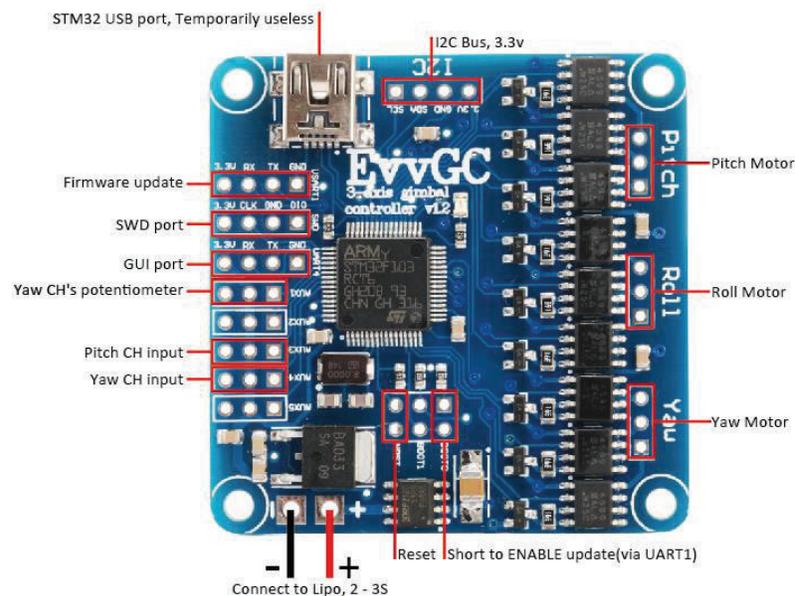


Figura 0.11.- Tarjeta de control EvgGC ,tomado de [56]

La tarjeta de control funciona a partir de un microcontrolador ARM de la familia de STM32 a una velocidad de reloj de 72MHz.

La tarjeta de control está dividida en 3 etapas:

- Regulación del voltaje, la cual sirve para alimentar al microcontrolador, con un voltaje de entrada de entre 7,4V hasta 11,1V. Esta etapa regula el voltaje tanto para el USB a 5V como para la IMU y el microcontrolador a 3.3V.
- Etapa de control, la cual contiene: un microcontrolador con 2 puertos USART para la programación y los ajustes del controlador, un puerto SWD (*Serial Wire Debug*), el cual sirve para hacer la revisión del programa en línea; puertos de entrada ADC que sirven para hacer el posicionamiento en el eje Yaw y Pitch; un puerto I2C el cual sirve para comunicarse con la IMU.
- Etapa de potencia, dispone de 9 transistores de efecto de campo Mosfet para controlar los tres motores.

En Tabla 2.5 se muestran las especificaciones de la tarjeta controladora EvvGC.

Tabla 0.5.- Especificaciones técnicas de la tarjeta controladora EvvGC, tomado de [58]

Procesador	STM32 (ARM Cortex M3) / STM32F103RC
Chip de potencia	Mosfet SOT363
Corriente de salida a motor	1 A / motor
Voltaje de entrada	7.4-11.1v
Interfaz	I2C: conexión con IMU Entrada ADC: entrada análoga PWM para interfaz externa RC UART1: conexión serial con GUI UART4: conexión serial para subir firmware
Frecuencia de	72 MHz

procesador	
Firmware	SimpleBGC (código abierto)

2.2.2.4 Algoritmo de control

Se implementó un controlador PD con bias en los tres ejes: pitch, roll, yaw basado en el controlador PD de dos ejes: pitch, roll de código abierto [59] presente por defecto en la tarjeta EvgGC el cual está programado en lenguaje C y puede ser modificada fácilmente en programas como Keil ® y Eclipse ®.

En la Figura 2.13 se muestra el diagrama de bloques del controlador, el mismo que esta implementado para cada eje (*Pitch, Roll, Yaw*) del estabilizador *gimballed*.

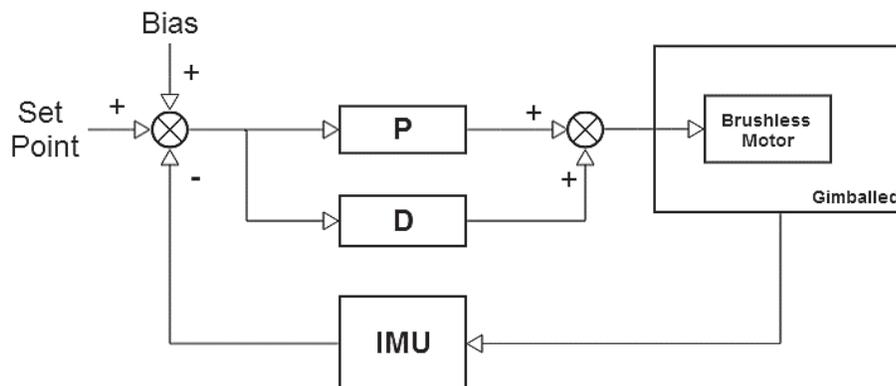


Figura 0.12.- Diagrama de bloques del controlador por cada eje

El controlador PD, permite un control con respuesta rápida de los motores, el Bias permite compensar el error en estado estacionario de posición en cada eje. Este tipo de controlador “PD + Bias” tiene la ventaja de ocupar pocos recursos de procesamiento.

Para la sintonización del controlador se usó un proceso iterativo de cambio de las constantes proporcional y derivativo a fin de obtener una respuesta rápida y estable la cual se verificó gráficamente mediante la instalación de una segunda

IMU conectada vía serial a un sistema de adquisición de datos desarrollado para esta aplicación con Arduino y Processing, que se muestra en la Figura 2.14.

Luego de dicha prueba se determinó que los valores adecuados de sintonización del controlador PD son los mostrados en la Tabla 2.6.

Tabla 0.6.- Valores de las constantes del controlador

	Kp	Kd
Pitch	0.29	0.013
Roll	0.27	0.013
Yaw	0.40	0.39

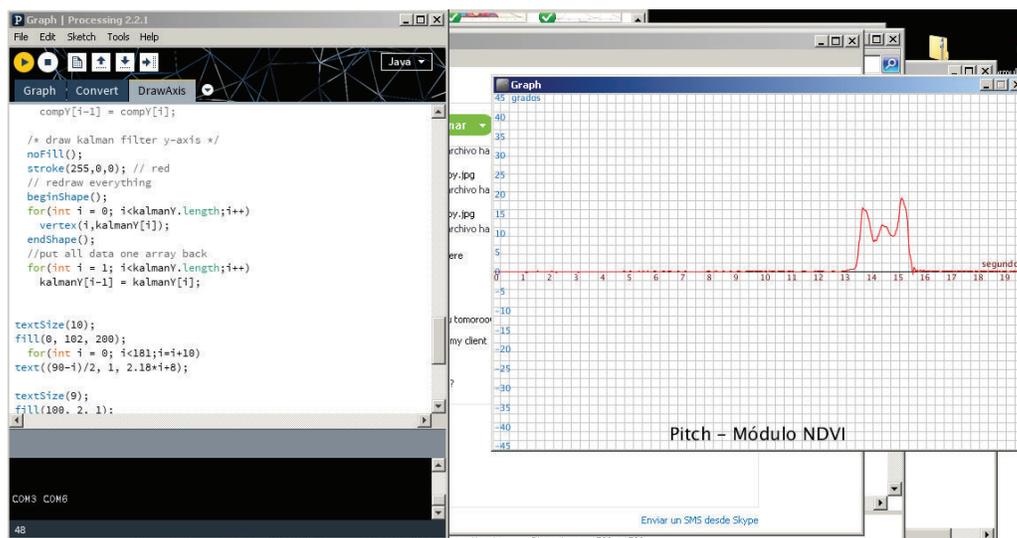


Figura 0.13.- Captura de pantalla: adquisición de datos de IMU mediante Processing para graficar la respuesta del controlador por cada eje

El cambio de variables se realizó usando la interfaz de usuario de la tarjeta EvgGC mostrada en la Figura 2.15.

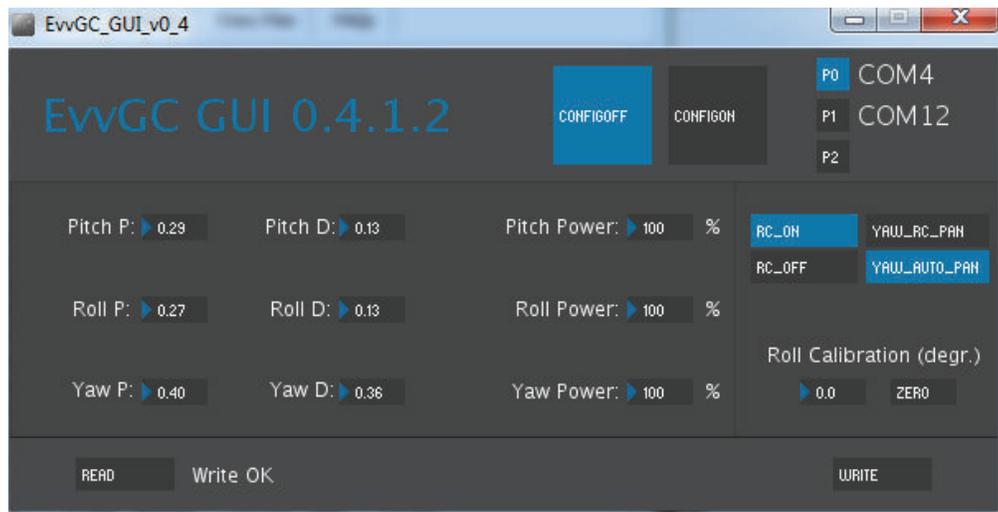
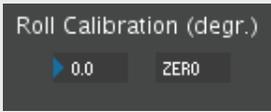
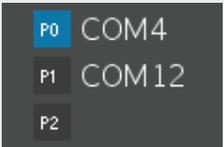


Figura 0.14.- Diagrama del Controlador

La interfaz de usuario Evgc GUI 0.4.1.2 es una pequeña aplicación en Java desarrollada por Evgc [59] para cambiar los valores de las constantes del controlador PD en los tres ejes mediante conexión serial con la tarjeta Evgc. En Tabla 2.7 se describe su funcionalidad:

Tabla 0.7.- Funciones del Evgc GUI 0.4.1.2

Bloque	Función
	Permite cambiar la constante P y D del controlador en los tres ejes.
	Limita la potencia efectiva que se entrega a los motores Brushless.

Bloque	Función
	<p>RC_ON/RC_OFF: activa/desactiva la opción Radio Control la cual lee el valor de entrada PWM tipo servo en el pin Pitch CH Input y Yaw CH Input, señal analógica que comanda el setpoint de cada eje respectivamente.</p> <p>YAW_RC_PAN/YAW_AUTO_PAN: opción desactivada en el presente trabajo.</p>
	<p>Permite modificar el valor en grados del punto tomado como referencia para el eje Roll, dejado por defecto en 0.</p>
	<p>Activa y desactiva la comunicación serial.</p>
	<p>Permite seleccionar el puerto serial al cual está conectada la tarjeta EwGC.</p>

2.2.1 COMUNICACIÓN

2.2.1.1 Selección de frecuencias

El sistema propuesto dispone de dos enlaces de comunicación, uno para datos y otro de video. Las frecuencias deben ser diferentes a las usadas en sistemas de control y comunicación de plataformas aéreas como UAVs o aviones ultraligeros.

En la Tabla 2.8 se muestran las frecuencias usadas por estos sistemas.

Tabla 0.8.- Frecuencias usadas para la aviación, tomado de [60]

Frecuencia	Nombre de la Banda
190 – 435 & 510 – 535 kHz	<i>Non-directional Beacons</i>
2100 – 28,000 kHz	<i>HF Communications</i>
75 MHz	<i>NAVAID (Marker Beacons)</i>
108 – 112 MHz	<i>VOR; ILS Localizer</i>
112 – 118 MHz	<i>VOR; SCAT-I Radionavigation data link</i>
118 – 137 MHz	<i>VHF Air / Ground Communications</i>
138 – 150.8 & 162 – 174 MHz	<i>Fixed, Mobil</i>
225 – 328.6 & 335.4 – 400 MHz	<i>UHF Air / Ground Communications (U.S. Military)</i>
328.6 – 335.4 MHz	<i>ILS Glide Slope</i>
406.1 – 420 MHz	<i>Fixed, Mobil</i>
932 – 935 & 941 – 944 MHz	<i>RMM, LLWAS, LDRCL, etc.</i>
960 – 1215 MHz	<i>NAVAID (TACAN / DME, etc.)</i>
1030 & 1090 MHz	<i>Air Traffic Control Radar Beacon; Mode S; TCAS</i>
1215 – 1390 MHz	<i>Air Route Surveillance Radar; GPS and GLONASS L1</i>
1545 – 1559 MHz	<i>Satellite-Based Comm (To Aircraft)</i>
1559 – 1610 MHz	<i>Satellite Navigation; GPS and GLONASS L1</i>
1646.5 – 1660.5 MHz	<i>Satellite-Based Comm (From Aircraft)</i>
1710 – 1850 MHz	<i>LDRCL; fixed links</i>
2700 – 3000 MHz	<i>Airport Surveillance and Weather Radar</i>
5000 – 5250 MHz	<i>Microwave Landing System</i>
5600 – 5650 MHz	<i>TDWR</i>
7125 – 8500 MHz	<i>RCL</i>
9000 – 9200 MHz	<i>Military Precision Approach Radar</i>
14.4 – 15.35 GHz	<i>Microwave Link</i>

Frecuencia	Nombre de la Banda
15.7 – 16.2 GHz	<i>Radar (ASDE-3)</i>
21.2 – 23.6 GHz	<i>Microwave Link</i>

De los datos anteriores se concluye que la frecuencia de 900 MHz para datos y 5.8 GHz para video están disponibles, sin embargo hay que tomar en cuenta que la comunicación de video deberá tener control de modulación a fin de que la señal no contamine otras frecuencias o canales, para la comunicación de datos el sistema deberá disponer de encriptación mediante modulación de señal o software.

2.2.1.2 Comunicación de Video

A continuación en Tabla 2.9 se presentan las especificaciones de tres transmisores/receptores de video.

Tabla 0.9.- Comparativa de transmisor/receptor de video, tomado de [61] [62] [63]

	3D Robotics – Transmisor y Receptor inalámbrico AV 5.8GHz 200mW	PAT-330 2.4GHz AV TV Wireless Transmitter Receiver	RFLinks LUV-200S Long distance video Surveillance system
			
Frecuencia	RX: 5705 – 5945MHz / 8CH TX: 5705-5945MHz / 8CH	2.4GHz ISM	TX: 2.452 MHz (SINGLE CHANNEL) RX: 2300 MHz- 2500 MHz
Potencia de salida	200mW/33dBm	110dBm	Max. 250 mW

	3D Robotics – Transmisor y Receptor inalámbrico AV 5.8GHz 200mW	PAT-330 2.4GHz AV TV Wireless Transmitter Receiver	RFLinks LUV-200S Long distance video Surveillance system
Sensibilidad de recepción	-90dBm	-90dBm	-92 dBm
Control de frecuencia	Phase lock loop	Ninguno	WFM
Señal Entrada	Señal de audio y video análoga	Señal de audio y video análoga	Señal de audio y video análoga
ANT conector	RP-SMA	Ninguno	SMA
Alimentación	TX: DC 7-12 v. / 850mA RX: DC 7-12V / 150mA	DC 5V-1000mA	TX: 7.5 V- 12 V RF RX: 12 V/ 300 mA
Tamaño y Peso	TX: 68*26*28mm 60g (73incl.. Antena) RX: 61*52*13mm	10cm (L) ×8.5cm (W) ×3.0cm (H).	TX: 1.5" X 0.8" X 0.22". 18g RX: 2.5" X 5.7" X 0.8"
Precio	\$200.00	\$28.00	\$500.00

Tomando en cuenta la potencia de salida, el tamaño, peso, el precio y que el dispositivo cuenta con *phase lock loop* (circuito de modulación, demodulación y reconstrucción de la señal que estabiliza la frecuencia de comunicación) se opta por el dispositivo “3D Robotics – Transmisor y Receptor inalámbrico AV 5.8GHz 200mW”.

2.2.1.3 Comunicación de Datos

En la Tabla 2.10 se presenta una comparativa de las especificaciones de varios transceptores de datos.

Tabla 0.10.- Comparativa de transceptores de datos.

	Xbee Pro S3B 900 Mhz + Xbee Explorer USB	HOPERF HM-TR Transparent Wireless Data Link – 433MHz	Digi Xtend 900 1W RPSMA
			
Transceiver chip	Analog Devices ADF702, Cortex-M3 EFM32G230 @ 28 MHz	OEM	No disponible
Frecuencia	902 MHz to 928 MHz	Mínima: 433 Mhz, Típico: 434 Mhz. Máxima: 439.75 Mhz	ISM 902 – 928 MHz
Data rate	10 Kbps or 20 Kbps	300-19200 bps	10 – 230,400 bps
Antena	Estación terrena: 900Mhz 16dBi RPSMA fibra de vidrio Dispositivo en vuelo: 900Mhz 5dBi RPSMA	SMA (female)	2.1dB antena dipolo RPSMA
Alcance	Hasta 9 mi (14 km) línea de vista con antena de dipolo Hasta 28 mi (45 km) línea de vista	330m línea de vista.	Hasta 14 mi (22 km) línea de vista con antena de dipolo Hasta 40 mi (64 km) línea de vista con

	Xbee Pro S3B 900 Mhz + Xbee Explorer USB	HOPERF HM-TR Transparent Wireless Data Link – 433MHz	Digi Xtend 900 1W RPSMA
	con antena de alta ganancia		antena de alta ganancia
Potencia	24 dBm (250 mW)	8dBm	1mW-1W (0-30dBm)
Sensibilidad de recepción	-101 dBm @ 200 Kbps, -110 dBm @ 10 Kbps	-100dBm	-110dBm
Voltaje	2.4 – 3.6 VDC	5VDC	2.8-5.5 VDC
Corriente	Tx: 215 mA Rx: 26 mA	34mA	RX:80mA
Interfaz	UART (3V), SPI	TTL, RS232	UART (5V), SPI
Topología	DigiMesh, Repeater, Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Peer-to-Peer	Point-to-Point, Peer-to-Peer	DigiMesh, Repeater, Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Peer-to-Peer
Modulación	FHSS	FSK	FHSS
Dimensiones	38 x 25 mm	24 x 43 x 12 mm	3.65 x 6.05 x 0.51 cm
Precio	\$147.00	\$51.50	\$450.00

De acuerdo a la Tabla 2.1 se escoge el dispositivo “Xbee Pro S3B 900 Mhz” ya que, cuenta con las características necesarias compatibles con la aplicación actual como frecuencia, interfaz, niveles de voltaje, modulación, potencia y alcance. Cabe recalcar que cuenta con modulación FHSS (espectro ensanchado por salto de frecuencia) que es un método de modulación en el que la señal se emite sobre una serie de radiofrecuencias aparentemente aleatorias, de esta manera los receptores no autorizados solo podrán recibir pocos bits de la trama sin poder interpretarlos. [64]

2.2.1.4 Gestor de comunicación

El gestor de comunicación es una placa base con microcontrolador de código abierto: Arduino Nano, el cual hace de interfaz entre el transceptor de datos (Xbee) y el controlador del estabilizador (EvvGC) interpretando los datos recibidos por el Xbee mediante comunicación serial y convertirlos en señales PWM leídas por el controlador EvvGC. Adicionalmente, sirve de interfaz entre el mismo transceptor de datos y el firmware de la cámara por medio de pulsos digitales.

Cabe recalcar que se escogió la placa Arduino Nano por su reducido tamaño y la facilidad de programación tanto del puerto serial como de sus salidas PWM.

En la Tabla 2.11 se presentan las especificaciones de la placa y en la Figura 2.16 el diagrama de flujo del código programado en el gestor de comunicación.

Tabla 0.11.- Especificaciones de la placa Arduino Nano, tomado de [57]

Microcontrolador	Atmega32u4
Voltaje	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Digital I/O Pins	20
Canales PWM	7
Entradas análogas	12
I/O Corriente DC	40 mA
I/O Corriente DC 3.3v	50 mA
Flash Memory	32 KB (Atmega32u4)
SRAM	2.5 KB (Atmega32u4)
EEPROM	1 KB (Atmega32u4)
Clock Speed	16 MHz

Tamaño y peso	43x18 mm, 5 g.
----------------------	----------------

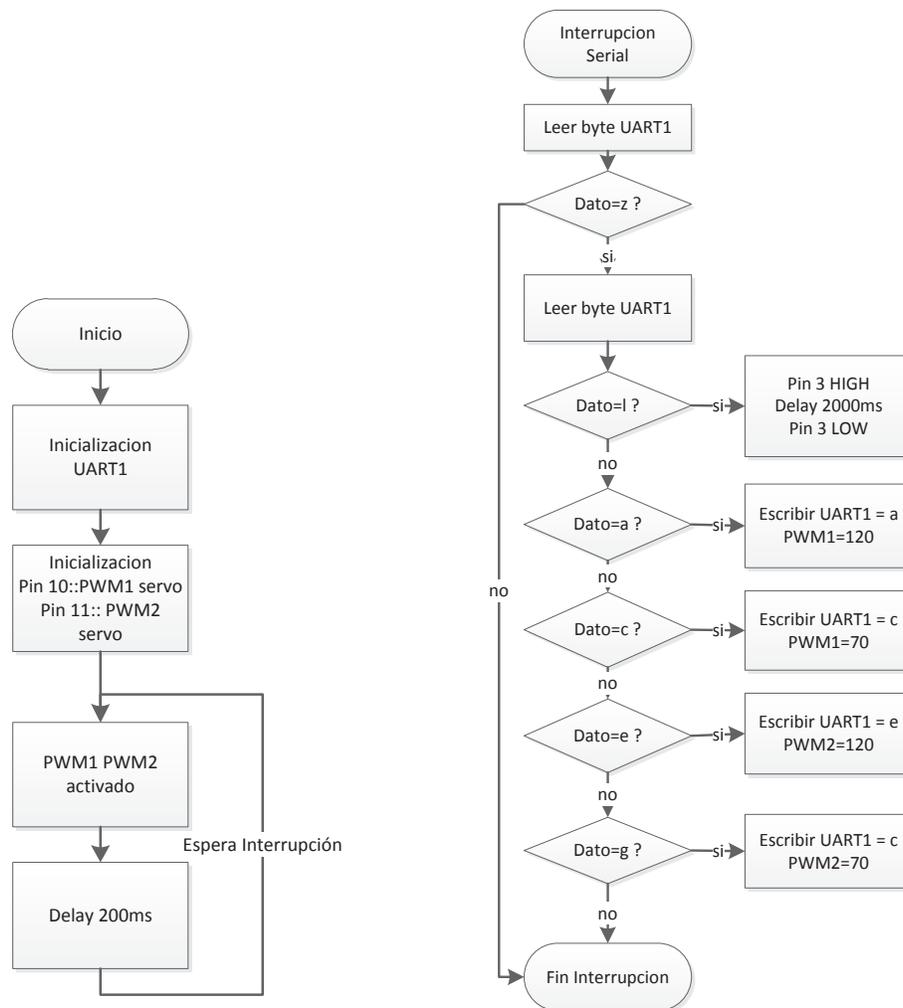


Figura 0.15.- Diagrama de Flujo Gestor de Comunicación

El diagrama de flujo anterior muestra dos sub-diagramas el primero comienza con la inicialización del puerto serial y la salida PWM1 y PWM2 y continua con un bucle infinito que deja activada la salida PWM con un valor fijo a la espera de la interrupción causada por el puerto serial. El segundo sub-bloque muestra el algoritmo a seguir cuando ocurre una interrupción, consiste en almacenar en dos variables diferentes los datos leídos por el puerto serial de dos en dos caracteres y compáralos con los caracteres almacenados, en el caso de obtener una

igualdad se procede a enviar nuevamente el carácter recibido vía serial y cambiar el valor de PWM1 y PWM2 y por consiguiente esta señal cambiara el setpoint del ángulo pitch y roll del gimballed.

2.3 ESTRUCTURA DE MONTAJE

Para el diseño de la estructura de montaje se tomó en consideración varios aspectos importantes en un sistema de fotografía aérea como:

- Estabilidad mecánica
- Volumen y peso reducidos
- Adecuada ventilación de los transmisores y demás componentes
- Adecuada colocación de antenas
- Correcta disposición de elementos para evitar el ruido electrostático generado por motores.

Para el diseño en 3D se uso el software “Solidworks” mediante el cual se realizó modelos tanto para Impresión 3D que se muestra en la Figura 2.16 como para corte CNC sobre placas de aluminio o madera, mostrados en la Figura 2.17.

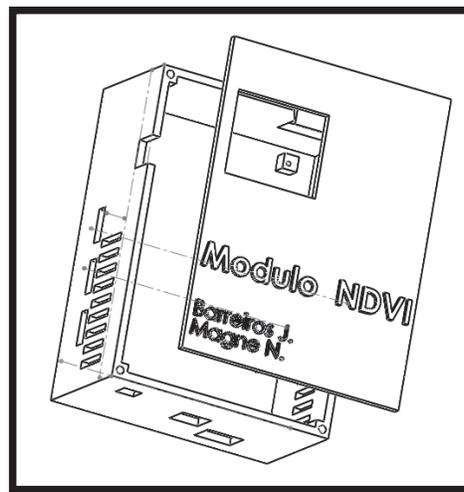


Figura 0.16.- Modelado de la estructura de montaje para impresión 3D

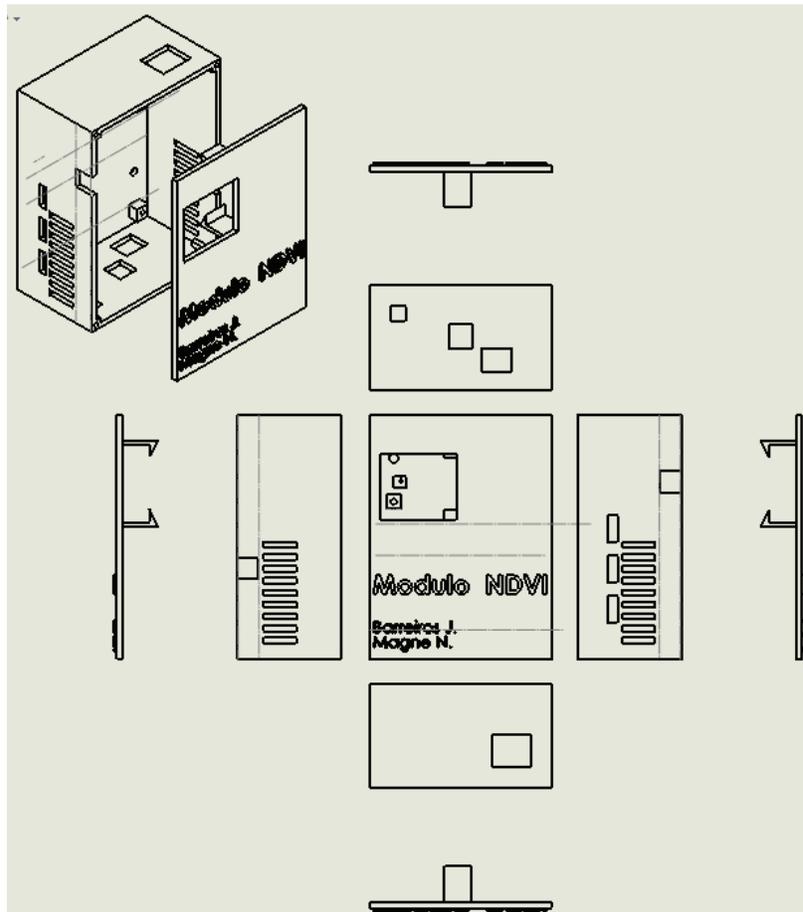


Figura 0.17.- Modelado de la estructura de montaje para corte CNC

2.4 SISTEMA COMPLETO

A continuación en Figura 2.18 se presenta el sistema terminado, tanto la estación terrena como el módulo multispectral aéreo. La estación terrena consta de un transceptor de datos, receptor de video, un convertor de video análogo a digital y antenas. El módulo multispectral aéreo consta de un estabilizador de ejes flotantes, una cámara multispectral y la estructura de montaje que tiene en su interior el trasmisor de video, transceptor de datos, controlador, gestor de comunicaciones y antenas.

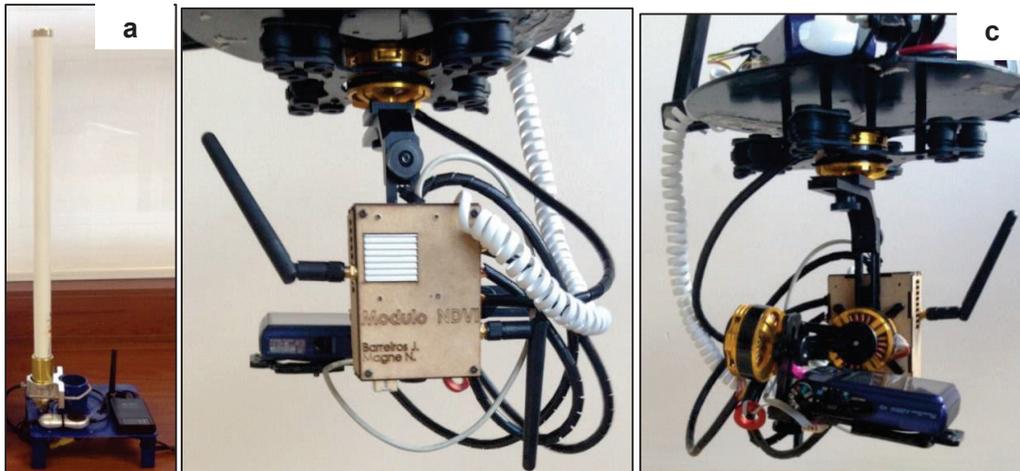
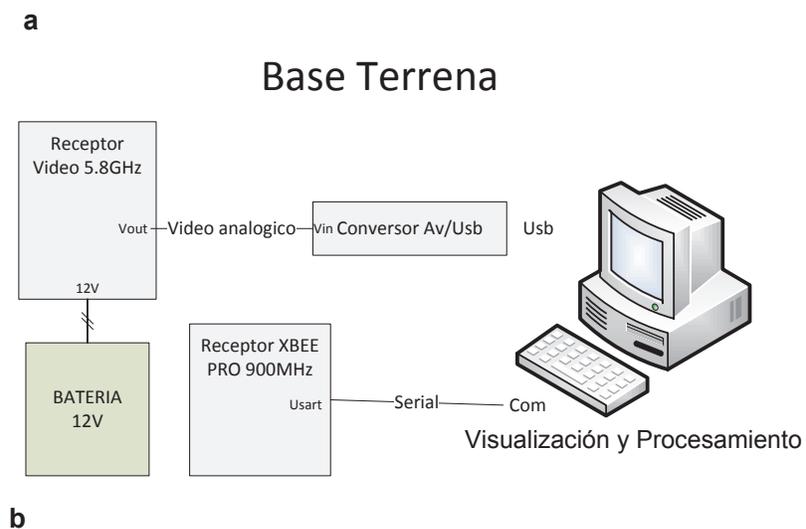


Figura 0.18.- Fotografía del sistema completo. a) estación terrena b) módulo multispectral aéreo, vista posterior c) módulo multispectral aéreo, vista frontal

En la Figura 2.19 se muestra el esquema de conexiones del sistema completo, tanto para el módulo multispectral aéreo como para la estación terrena.



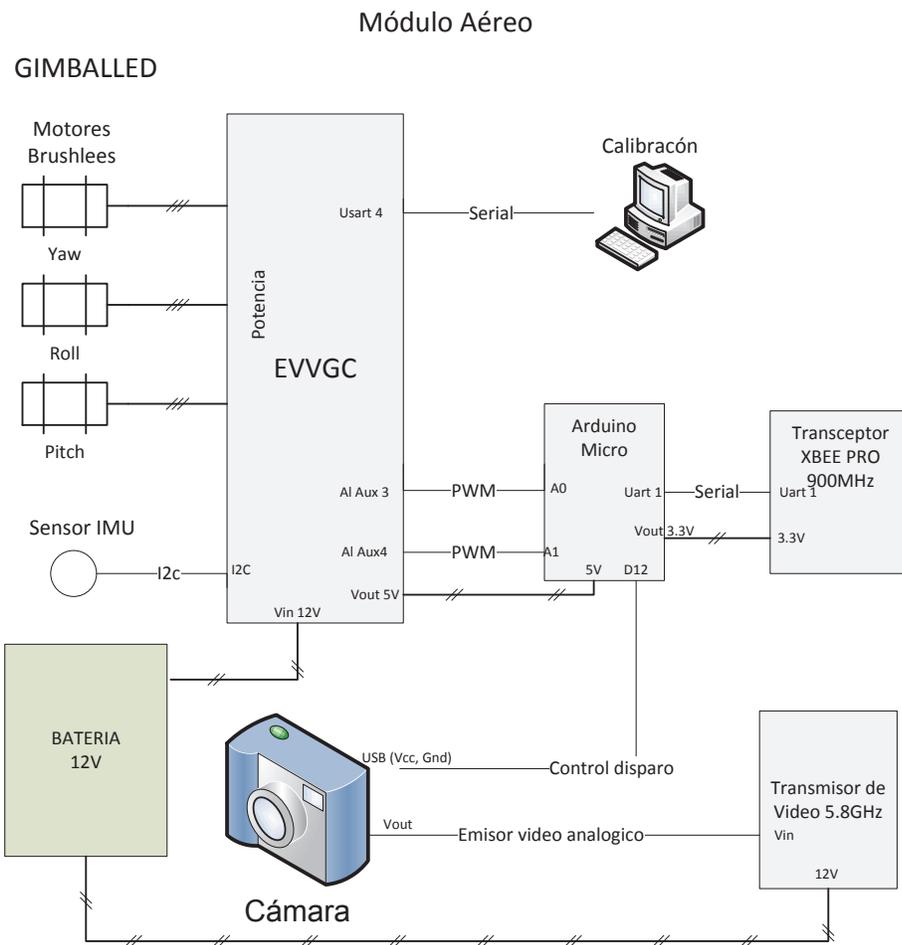


Figura 0.19.- Esquema de conexiones. a) estación terrena b) módulo multispectral aéreo

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN Y HMI.

El software de procesamiento de imagen y el HMI han sido programados en MATLAB debido a la facilidad de procesar matrices con varias dimensiones.

La HMI consta de: visualización y control en el primer panel; procesamiento en el segundo panel y ayuda en el tercer panel.

3.1 VISUALIZACION

El sub panel de visualización incluye un bloque de video multiespectral y otro de video NDVI en línea. Adicionalmente, dispone de un bloque de pre-procesamiento donde se muestra la última imagen capturada, la imagen en NDVI y el histograma de la misma, en la figura 3.1 se puede observar de mejor manera el panel.

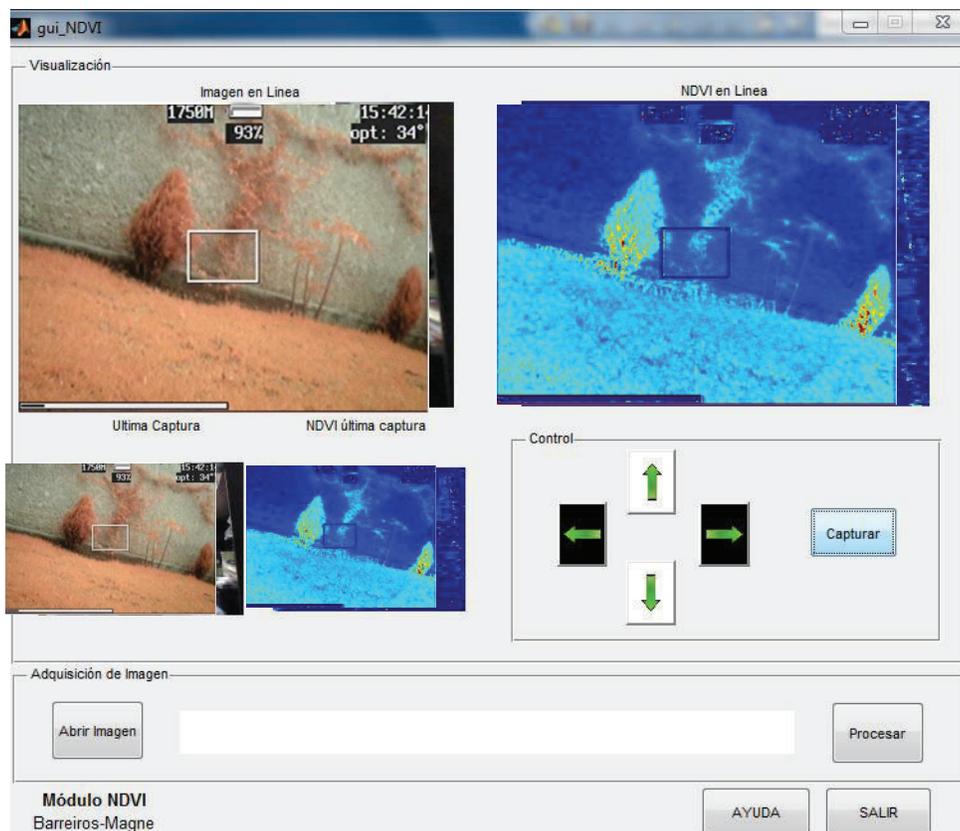


Figura 0.1.- Capturas de pantalla Modulo Visualización HMI

3.2 CONTROL

El sub panel de control incluye botones para posicionar la cámara en los ejes *pitch* y *yaw*, también dispone de un botón de disparo remoto de la cámara multiespectral, el cual se muestra en la Figura 3.2.

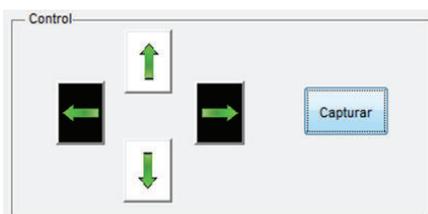


Figura 0.2.- Capturas de pantalla del Módulo de Control en la HMI

3.3 PROCESAMIENTO

El sub panel de procesamiento incluye un botón que permite ubicar la dirección de la imagen multiespectral previamente adquirida en alta calidad.

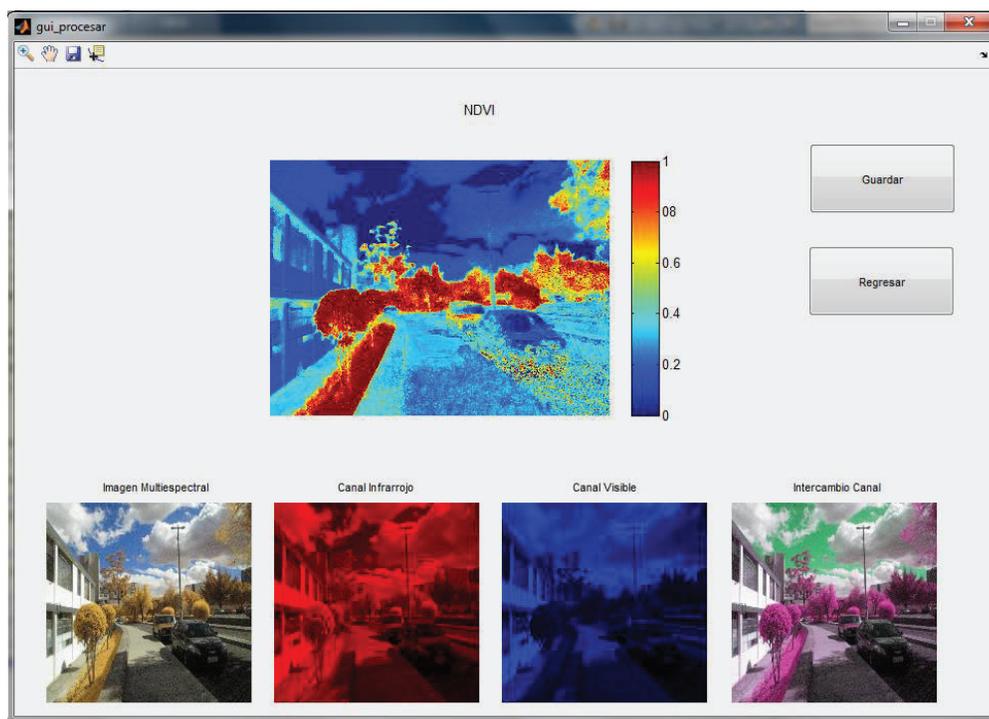


Figura 0.3.- Capturas de pantalla Modulo Procesamiento HMI

También incluye la visualización de la imagen NDVI en alta definición con la posibilidad de evaluar el índice pixel por pixel.

En la parte inferior se incluye de manera demostrativa los canales correspondientes a cada espectro usado en el cálculo de NDVI, adicionalmente se incluye una fotografía NGB. El subpanel de procesamiento se muestra en la Figura 3.3.

3.3.1 ALGORITMO DE PROCESAMIENTO

El algoritmo de procesamiento se realizó en el programa computacional MATLAB debido a sus facilidades para trabajar con matrices y la realización de operaciones. Para obtener la imagen en NDVI primeramente se carga la imagen en formato JPEG tomada con la cámara multiespectral en una variable, esta variable posee 3 matrices de número de columnas igual al ancho de la imagen y de número de filas igual al alto de la misma.

Cada matriz representa un color de la codificación del formato de imagen, siendo estos el rojo, verde y azul; cada elemento de las matrices equivale a la intensidad de cada pixel con una resolución de 8 bits es decir desde 0 a 255, siendo 0 intensidad nula y 255 máxima intensidad.

Al tener la imagen cargada se procede a dividirla en cada uno de sus canales, y así tenemos en el canal rojo la información correspondiente al infrarrojo cercano y en el canal azul y verde información del visible. Por efecto del filtro de gel usado la información del canal azul es más significativa, por lo que se procede a utilizarlo para el siguiente análisis.

Teniendo la información las matrices con información espectral del visible y del NIR se procede a realizar la operación de calibración y cálculo de NDVI pixel por pixel.

Se transforma la imagen en falso colores para una mejor apreciación.

El diagrama de flujo se muestra en la Figura 3.4.

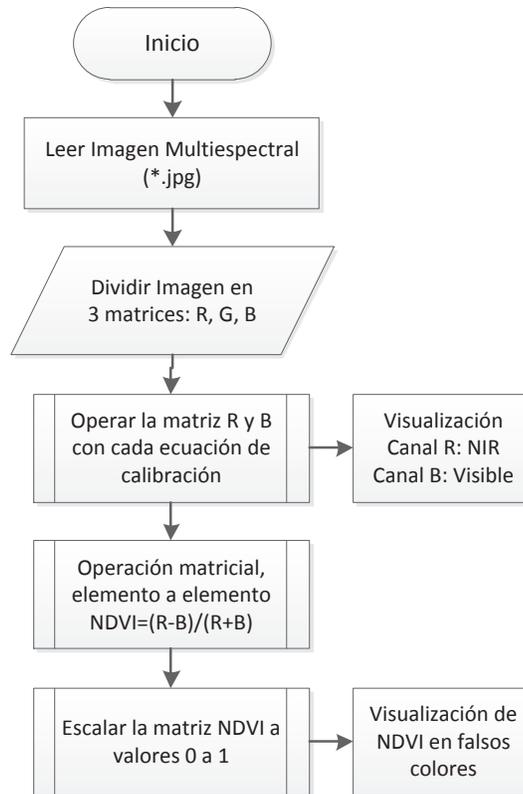


Figura 0.4.- Diagrama de flujo del algoritmo de procesamiento implementado en Matlab

El diagrama anterior muestra el algoritmo básico de procesamiento NDVI y consiste en leer la imagen multiespectral en formato jpg para luego almacenar la información de cada canal RGB en una variable diferente; posteriormente, se recalcula la matriz del canal R y B con la ecuación de calibración para obtener los valores reales de reflectancia en cada canal. Finalmente, se calcula el NDVI pixel por pixel, se escala la matriz NDVI a valores de 0 a 1 y se visualiza la matriz en falsos colores mediante la función `colormap (jet)`.

3.3.2 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN

Para asegurar que tanto las bandas espectrales, la temperatura del color y los valores de reflectancia medidos sean los correctos es necesario realizar dos calibraciones: Balance de Blancos y de Reflectancia.

3.3.2.1 Calibración de Balance de Blancos

Una parte importante para asegurar la repetitividad de los resultados es asegurar que la temperatura del color sea la misma en todas las fotografías y en todas las condiciones de luz posibles, para lograr este objetivo se realiza una calibración de balance de blancos en el firmware embebido de la cámara.

Este procedimiento es usado para enseñarle a la aplicación cual es el color de referencia en las condiciones presentes de iluminación, es por esta razón que la prueba debe ser hecha dentro inmediatamente antes de realizar las capturas.

Para la calibración de balance de blancos, el firmware CHDK usado en el presente trabajo presenta la opción de evaluar un objetivo que deberá tener un color específico el cual la cámara lo considerará como “blanco”. Este objetivo deberá ser siempre el mismo para todas las pruebas realizadas y en este caso es un pedazo de cartón de color azul mostrado en la Figura 3.5.

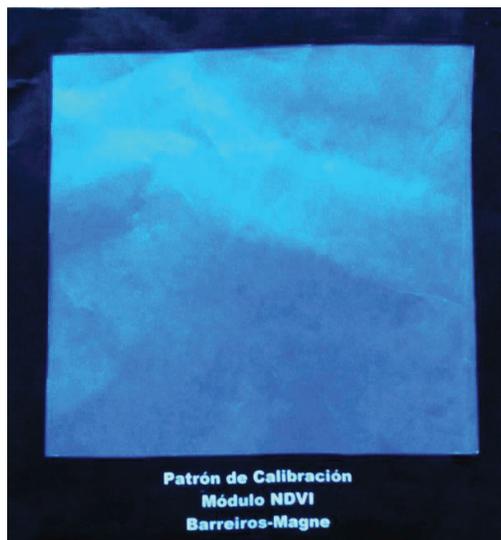


Figura 0.5.- Patrón de calibración de balance de blancos

A continuación se presentan los pasos a seguir para realizar la evaluación de balance de blancos:

1. Colocar la cartulina que tenga el color de referencia en un lugar iluminado donde se vaya a realizar las futuras fotografías.
2. Ingresar al menú de “Custom White Balance” de la cámara Canon, como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 0.6.- Captura de pantalla: evaluación del balance de blancos Canon

3. Enfocar la cartulina de referencia, asegurándose que cubra todo el objetivo y que no esté sobrepuesta por el reflejo directo del sol.
4. Finalmente, disparar la cámara para que se guarden los valores de balance de blancos personalizado.

3.3.2.2 Calibración de Reflectancia por Comparación Directa

Existen dos métodos de calibración posibles: el primero es calibración directa por comparación en NDVI y el segundo método es calibración directa por comparación mediante espectrometría. El primer método relaciona el índice NDVI de una cámara multiespectral patrón con el índice de la cámara del sistema propuesto. El segundo método, compara el índice de reflectancia en cada espectro (visible y NIR) de un material con el valor RGB en cada canal de una fotografía del mismo material, en la Tabla 3.1 se muestra las ventajas y desventajas de cada método.

Tabla 0.1.- Métodos de Calibración

Método	Ventajas	Desventajas
Comparación Directa con dispositivo NDVI	<ul style="list-style-type: none"> - Sencillo y rápido - Se requiere una sola ecuación de ajuste 	<ul style="list-style-type: none"> - Es necesario una cámara multiespectral calibrada
Comparación Directa con Espectrometría	<ul style="list-style-type: none"> - Barato - No es necesario una cámara multiespectral de referencia 	<ul style="list-style-type: none"> - Calibración en cada banda espectral, es necesario de un software de espectrometría. - Se requiere dos ecuaciones de ajuste una por cada banda (visible y NIR)

Del cuadro comparativo anterior se concluye usar el método de calibración por espectrometría ya que no se dispone de una cámara multiespectral patrón.

El método de calibración por espectrometría consiste en comparar el índice promedio de reflectancia en cada rango de espectros utilizados en el satélite Landsat y la intensidad del pixel de la cámara en el canal correspondiente mediante pruebas realizadas sobre varios materiales.

A continuación se detallan los pasos para el Método de Calibración por Espectrometría:

1. Seleccionar varias muestras de diferentes materiales y colores
2. Medir la reflectancia en cada banda visible y NIR de cada material usando un espectrómetro
3. Medir la intensidad promedio de pixeles en el canal R y B de una fotografía para cada material.
4. Tabular y graficar los datos de reflectancia e intensidad de pixeles para cada banda y para cada material

5. Linealizar la curva mediante el método de mínimos cuadrados
6. Incluir la ecuación de calibración en el software de procesamiento realizado en Matlab

Para medir la reflectancia de varios materiales en el rango del satélite Landsat, se utiliza un espectrómetro OceanOptics USB4000 y una fuente de luz halógena con respuesta en todo el espectro visible y NIR programado de tal manera que realice un promedio de la reflectancia en el rango del VIS (450-700 nm) y en el rango del NIR (750-900 nm). El equipo utilizado se muestra en la Figura 3.7.



Figura 0.7.- Equipos utilizados para las pruebas de reflectancia de materiales por espectrometría

En la Figura 3.8 se muestra la programación del espectrómetro OceanOptics usando el software OceanView para medir la reflectancia de un material en cada banda.

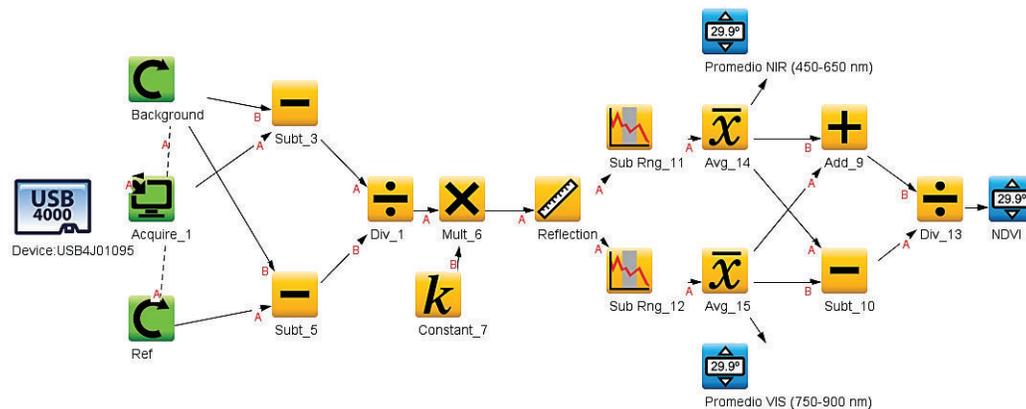


Figura 0.8.- Algoritmo realizado para medir la reflectancia con el software OceanView usando un espectrómetro OceanOptics USB4000

Para medir la intensidad de pixeles de la imagen en cada material se calcula el promedio de la matriz en el segmento de imagen correspondiente, en el canal rojo para el NIR y el canal Azul para el VIS, proceso mostrado en la Figura 3.9.

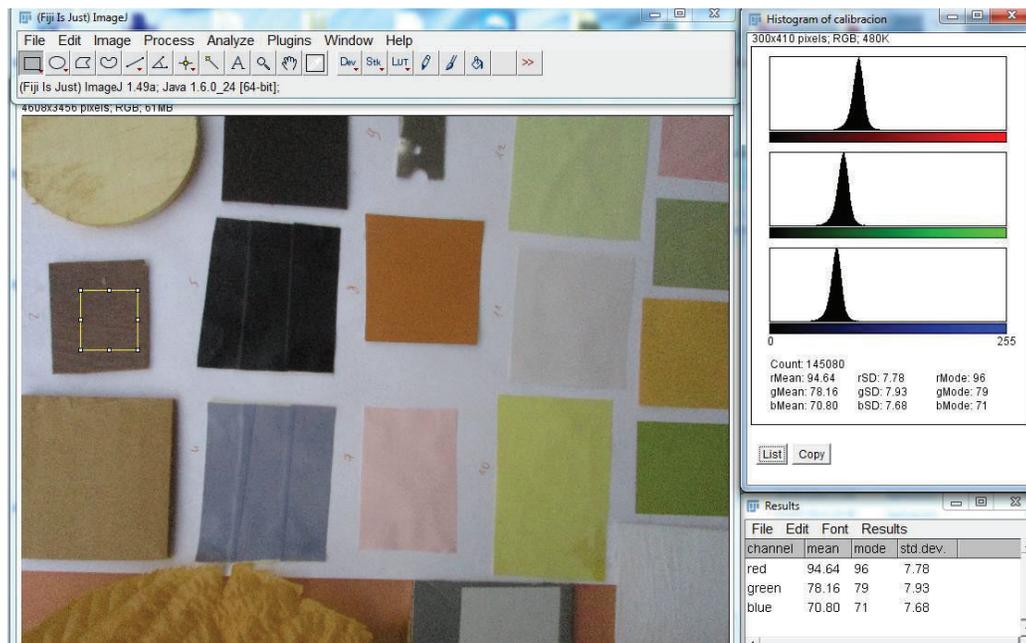


Figura 0.9.- Medida de valor promedio en un área de pixeles

De los datos obtenidos se procedió a tabular y obtener el modelo de la curva de reflectancia vs intensidad de pixel por cada material, en la Figura 3.10 se puede observar la curva en la banda NIR y en la Figura 3.11 en la banda VIS.

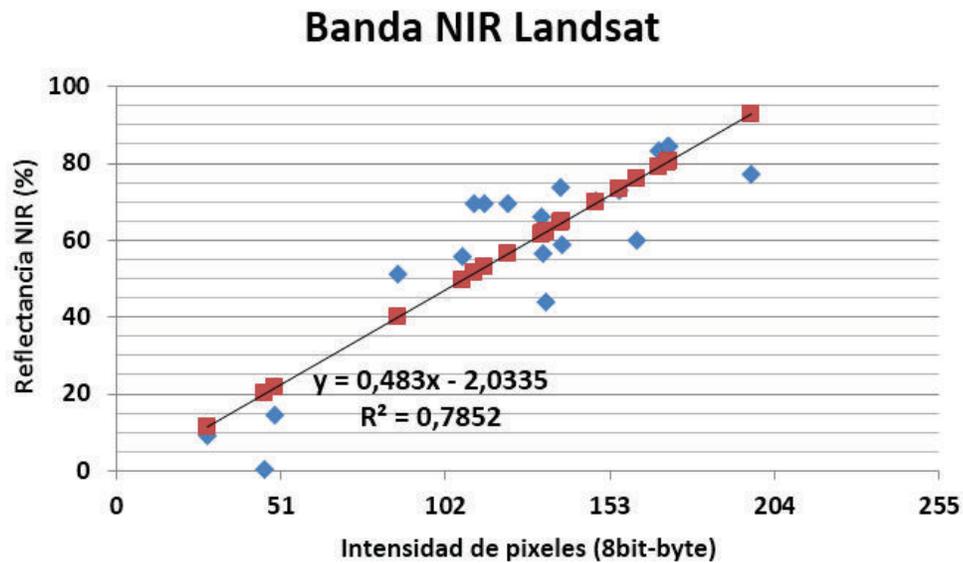


Figura 0.10.- Linealización de la curva de Reflectancia (espectrómetro) vs Intensidad de pixel (cámara) en el rango espectral NIR.

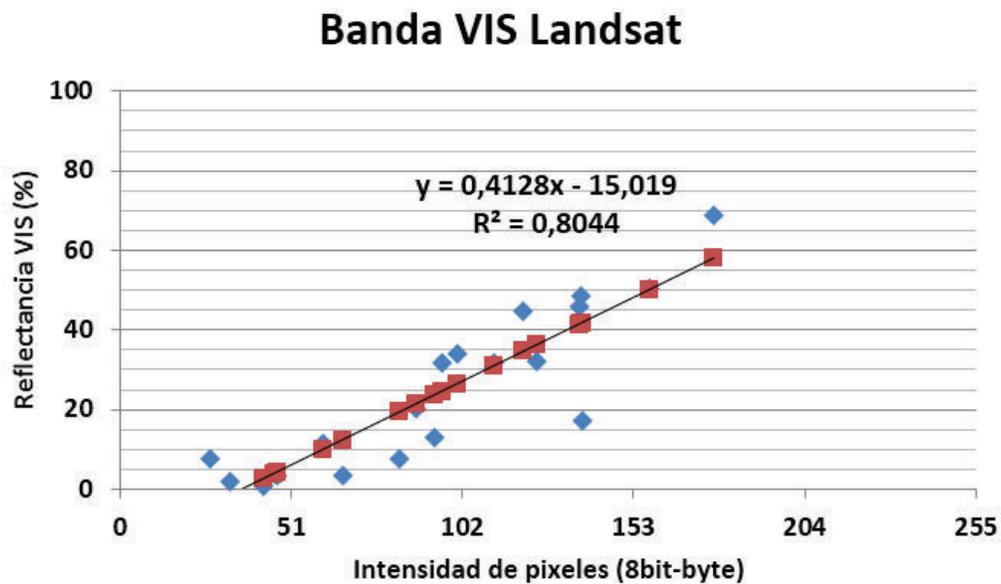


Figura 0.11.- Linealización de la curva de Reflectancia (espectrómetro) vs Intensidad de pixel (cámara) en el rango espectral VIS.

Finalmente del proceso de calibración se obtienen las siguientes ecuaciones:

Para NIR (3.1):

$$\text{Reflectancia NIR} = 0.483 * (\text{intensidad de pixel canal Rojo}) - 2.0335 \quad (3.1)$$

Para Visible (3.2):

$$\text{Reflectancia VIS} = 0.4128 * (\text{intensidad pixel canal Azul}) - 15.019 \quad (3.2)$$

Estas ecuaciones de calibración son usadas en el procesamiento de la imagen en MATLAB a fin de obtener valores reales de NDVI.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 COMUNICACIÓN

Las pruebas para la comunicación del sistema se dividen en dos partes, una para el enlace de video y otra para el enlace de datos.

4.1.1 Enlace de Video

Para la prueba del enlace de video se toman en cuenta los siguientes parámetros:

- La calidad de la imagen
- La distancia entre el transmisor y receptor

A fin de medir las distancias, se estableció como punto base el edificio de EARME en el campus de la EPN y el Palacio de Cristal en el parque Itchimbia. Se tomaron pruebas de transmisión de video a distintas distancias en línea de vista, medidas mediante un medidor de distancia NIKON Laser 1200. En la Figura 4.1 se muestran mediante Google Maps los tramos utilizados para las pruebas.

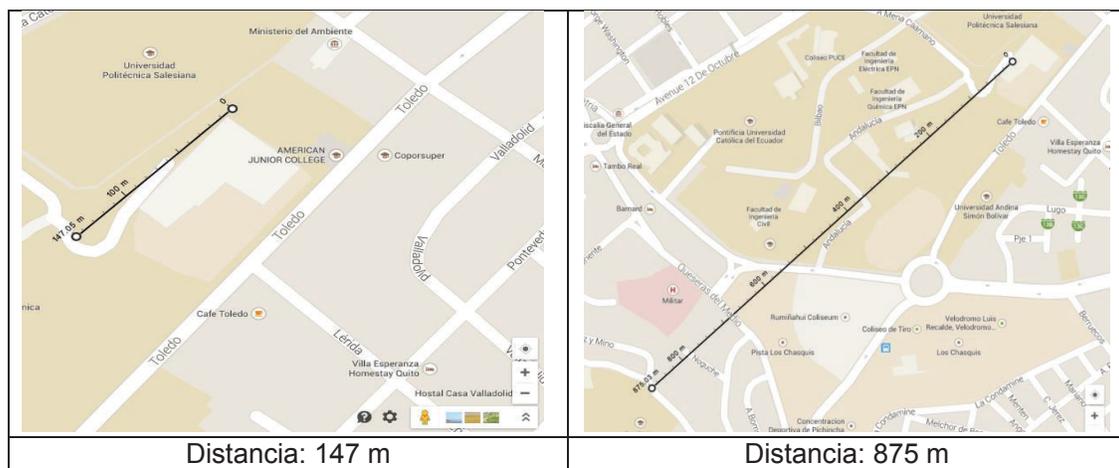




Figura 0.1.- Puntos geográficos donde se realizó las pruebas de transmisión de video, tomado de Google Maps

En Tabla 4.1 se realiza un resumen de las pruebas con su respectiva valoración cualitativa realizada por los autores. Para la valoración de calidad de recepción se usaron los siguientes criterios: Malo, Aceptable, Excelente los cuales se muestra en la Figura 4.2.

Tabla 0.1.- Valoración realizada por los autores de la calidad de recepción de video vs distancias.

Muestra	Distancia	Valoración de calidad
1	147,05 m	Excelente
2	549,52 m	Excelente

Muestra	Distancia	Valoración de calidad
3	575,47 m	Excelente
4	674,32 m	Malo
5	875,03 m	Aceptable
6	1000 m	Aceptable
7	1210 m	Malo

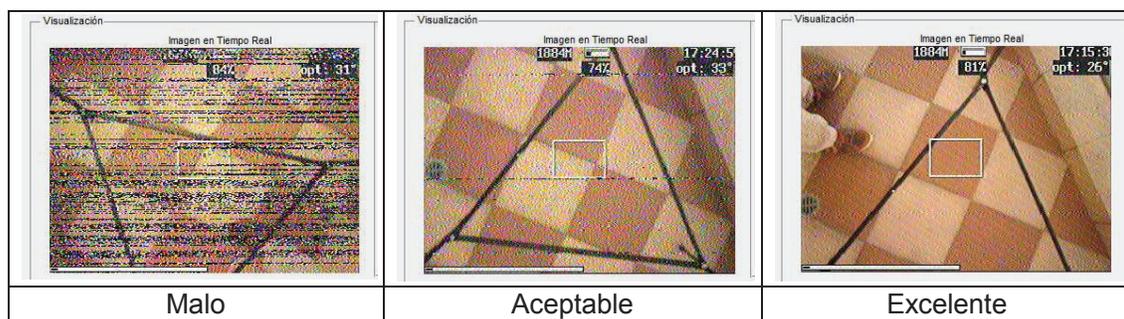


Figura 0.2.- Criterios de valoración de calidad de video. a) malo b) aceptable c) excelente

Como conclusión, se establece que la distancia máxima para obtener una calidad de video aceptable en nuestro sistema es de 1km. Cabe recalcar que la calidad de video se ve afectada en zonas urbanas donde se tienen gran cantidad rejas, autos o antenas de comunicación debido al ruido electromagnético. Es por esta razón que en la Muestra 4 de Tabla 4.1 se obtiene la valoración de Malo.

4.2 DISPOSITIVO DE ESTABILIZACIÓN GIMBALLED

Para el estabilizador Gimballed se realizaron las siguientes pruebas de funcionamiento: Respuesta transitoria y en estado estable a perturbaciones y Prueba de ángulo máximo de giro.

4.2.1 Respuesta del controlador

Para esta prueba se obtuvo la respuesta transitoria y estable para los tres ejes: *pitch*, *roll* y *yaw* mediante la perturbación manual en diferentes ángulos.

- Eje *Pitch*

En la Figura 4.3 se puede observar la respuesta del eje pitch ante perturbaciones tanto positivas como negativas.

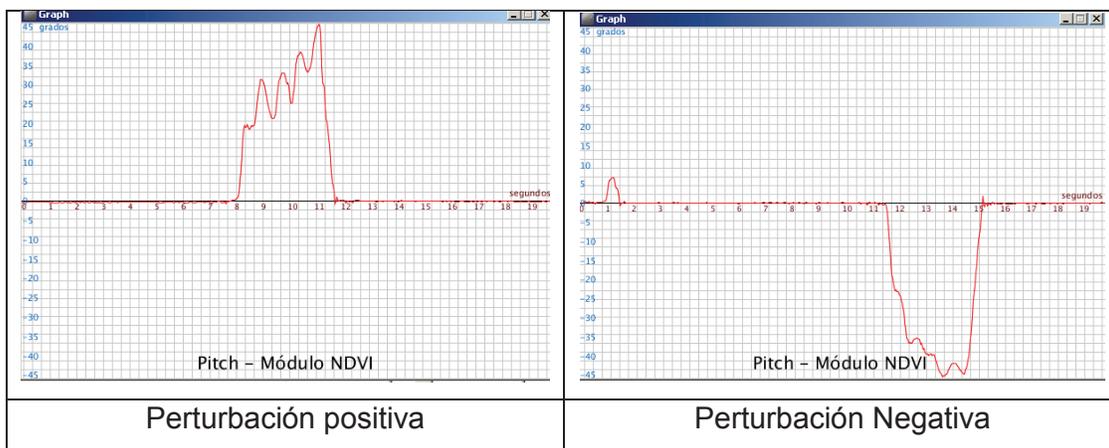


Figura 0.3 .-Respuesta ante perturbaciones en el eje Pitch

- Roll

En la Figura 4.4 se puede observar la respuesta del eje Roll ante perturbaciones tanto positivas como negativas.

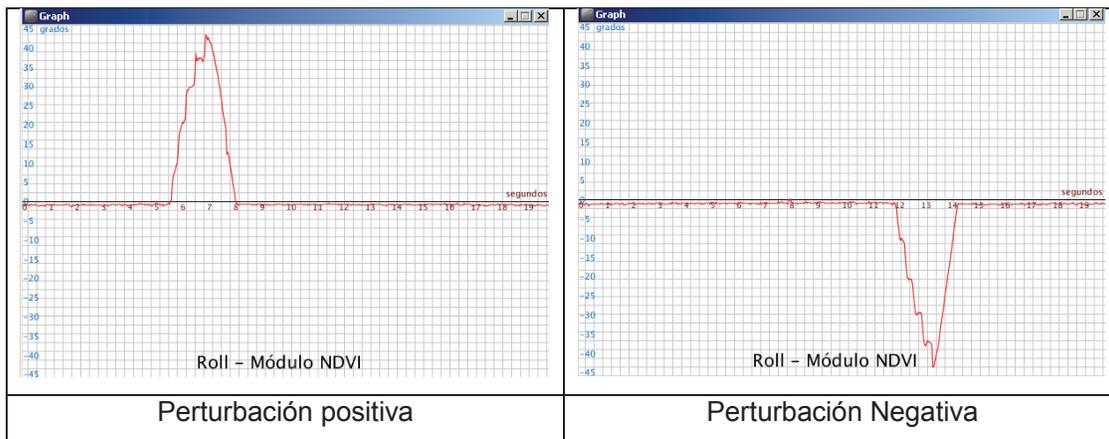


Figura 0.4 .-Respuesta ante perturbaciones en el eje Roll

- Yaw

En la Figura 4.5 se puede observar la respuesta del eje Yaw ante perturbaciones tanto positivas como negativas.

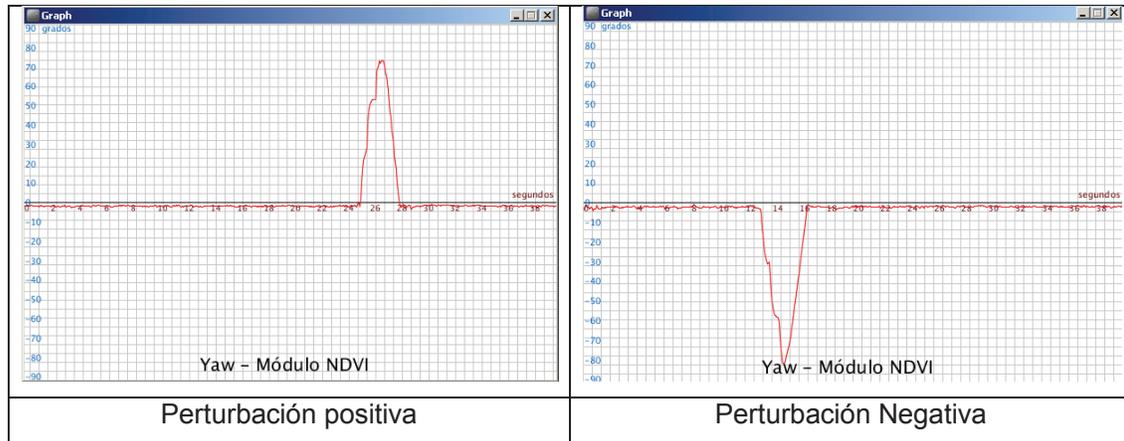


Figura 0.5 .-Respuesta ante perturbaciones en el eje Yaw

En Tabla 4.2 se muestra un resumen del tiempo de establecimiento vs el ángulo perturbado respecto al setpoint, medido mediante una segunda IMU de características iguales a la usada en el gimbal.

Tabla 0.2 .-Tiempo de establecimiento del gimbal de la respuesta a una perturbación manual en cada eje.

Tiempo de establecimiento (s)					
Pitch		Roll		Yaw	
Angulo de perturbación	Segundos	Angulo de perturbación	Segundos	Angulo de perturbación	Segundos
47°	0.52	44°	1.18	73°	1.25
36°	0.62	35°	0.92	60°	1.58
22.5°	0.34	25°	0.66	34°	0.99
17.7°	0.39	18.5°	0.46	-38°	1.12
10°	0.35	13°	0.39	-60°	0.92
7°	0.36	7°	0.23	-82°	1.78
-5°	0.19	-6.5°	0.28		

Tiempo de establecimiento (s)					
Pitch		Roll		Yaw	
Angulo de perturbación	Segundos	Angulo de perturbación	Segundos	Angulo de perturbación	Segundos
-7.5°	0.32	-9°	0.29		
-13°	0.29	-17°	0.37		
-23°	0.72	-32°	0.84		
-29.5°	0.69	-37°	0.85		
-44°	0.95	-44°	0.87		

4.2.2 Prueba de ángulos de Giro

Tanto en la Figura 4.6 como en la Figura 4.7 se observa los ángulos máximos de giro posibles en los cuales el dispositivo continúa realizando una correcta estabilización; cabe recalcar que en el eje yaw, el ángulo de giro es de 360°

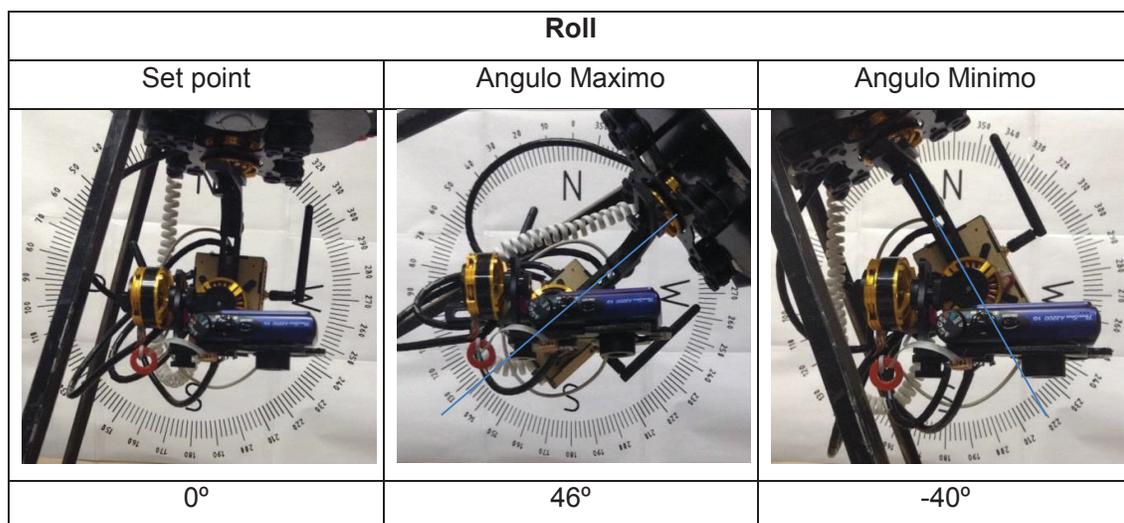


Figura 0.6 .-Prueba de ángulos de giro en el eje roll

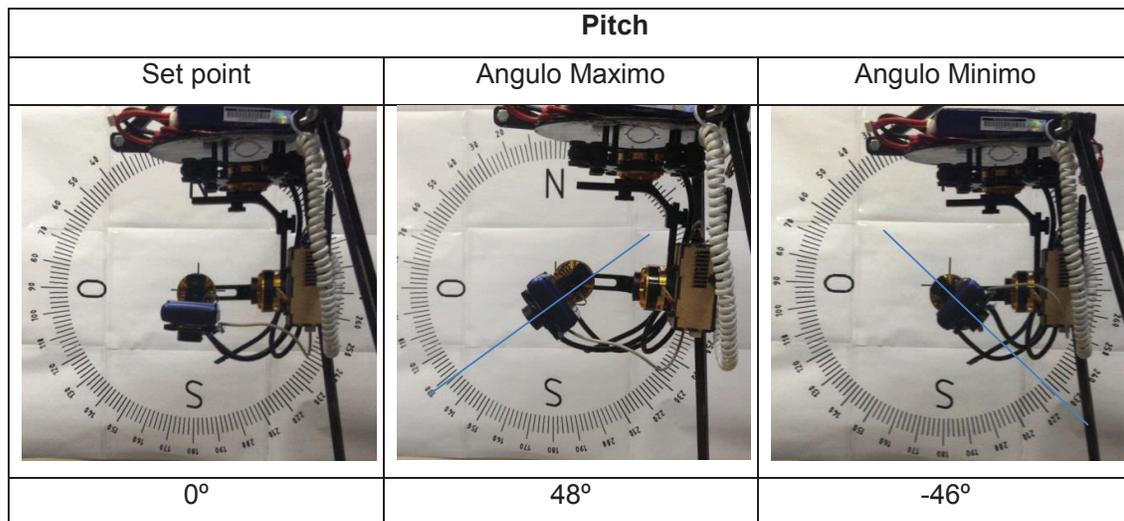


Figura 0.7.- Prueba de ángulos de giro en el eje pitch

4.3 CÁMARA MULTIESPECTRAL

Se realizaron dos pruebas de la cámara multiespectral: Reflectancia de Materiales y Prueba Cualitativa de Imágenes NDVI

4.3.1 Prueba de Reflectancia de Materiales

La siguiente prueba consiste en comparar el índice NDVI de varios materiales medida con un espectrómetro OceanOptics USB4000 y con la cámara multiespectral del presente trabajo previamente calibrada. En los resultados se evalúa la desviación estándar entre las dos medidas, las cuales se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 0.3.- Varianza entre NDVI medido con espectrómetro y con cámara multiespectral

Muestra	NDVI (espectrómetro)	NDVI (imagen multiespectral)	Varianza
1	0,66	0,77	0,0127
2	0,28	0,43	0,0233
3	0,24	0,20	0,0016

Muestra	NDVI (espectrómetro)	NDVI (imagen multiespectral)	Varianza
4	0,10	0,11	0,0002
5	0,89	0,86	0,0010
6	0,30	0,46	0,0255
7	0,10	0,08	0,0006
8	0,20	0,18	0,0003
9	0,53	0,56	0,0008
10	0,37	0,24	0,0160
11	0,81	0,69	0,0151
12	-0,02	0,08	0,0096
13	0,90	0,91	0,0001
Coefficiente de Determinación R²			0,9173
Error típico			9,03%

Del análisis anterior se concluye que al tener un coeficiente de determinación R^2 cercano a uno, la medida de NDVI con la cámara multiespectral del presente trabajo se ajusta satisfactoriamente a las medidas patrones tomadas por espectrometría.

Adicionalmente, se concluye que el error típico de nuestro sistema en la variable NDVI es de 9.03% valor que está dentro del rango de error aceptable de NDVI (<15%) [24].

4.3.2 Prueba cualitativa de imágenes

En la siguiente prueba se tomaron fotografías aéreas multiespectrales de un área urbana con presencia de vegetación. En los resultados se evalúa aspectos

cualitativos como presencia de vegetación y objetos inertes, densidad de las plantas, sequía aparente, etc.

Análisis cualitativo:

En la Figura 4.8 se muestra una imagen multiespectral y en la Figura 4.9 se muestra dicha imagen procesada con NDVI en donde se diferencian claramente las áreas con presencia de vegetación las cuales tienen NDVI de 0.64 - 1, rango válido para vegetación.

Las áreas sin vegetación tienen índices cercanos a 0. Cabe recalcar que en la imagen procesada con NDVI se puede verificar la densidad de las plantas.

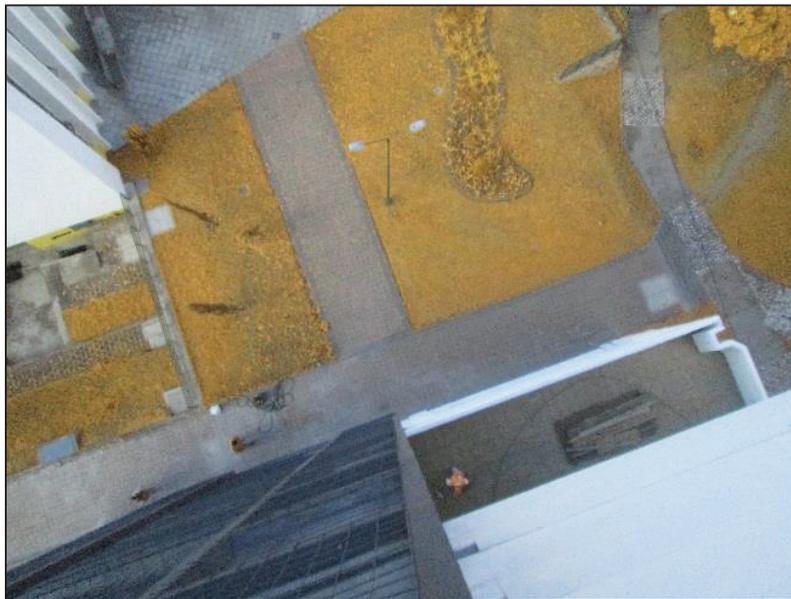


Figura 0.8.- Fotografía de cámara multiespectral

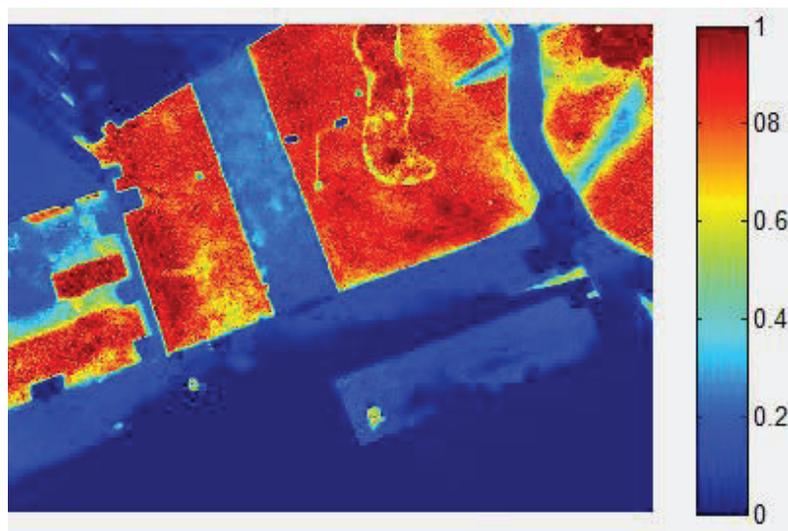


Figura 0.9.- NDVI de imagen multispectral

En la Figura 4.10 y Figura 4.11 se muestran una imagen multispectral y NDVI respectivamente. En la imagen NDVI se diferencian los lugares sin presencia de vegetación como el cielo, calles, edificios, casas, autos los cuales tienen NDVI de 0 - 0.35, índice válido para áreas sin vegetación. También se verifica que con objetos distantes como el horizonte y la montaña se obtienen valores NDVI válidos.

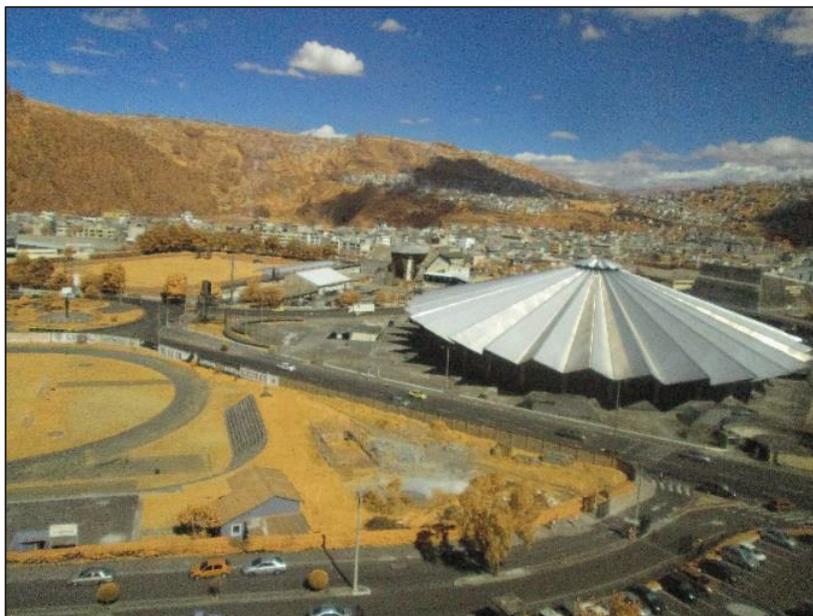


Figura 0.10.- Fotografía de cámara multispectral

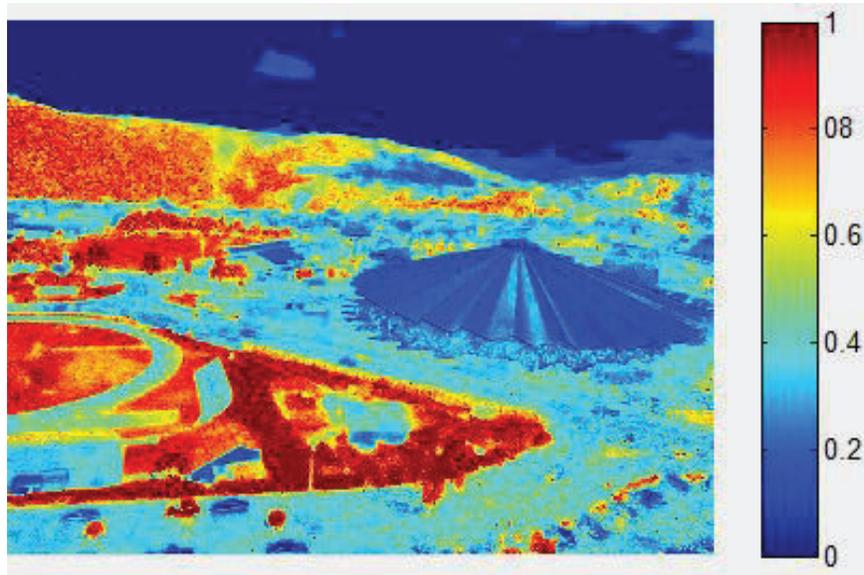


Figura 0.11.- NDVI de imagen multiespectral

A continuación, desde la Figura 4.12 a la Figura 4.16 se presentan varias imágenes multiespectrales procesadas mediante NDVI:

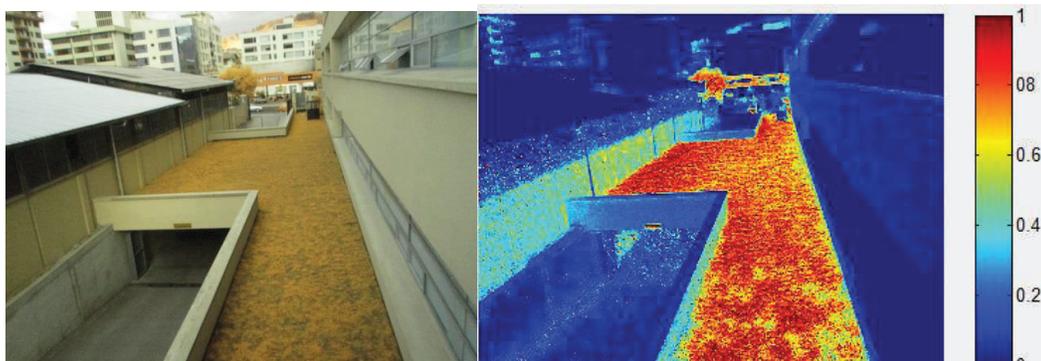


Figura 0.12.- Fotografía multiespectral y NDVI exteriores

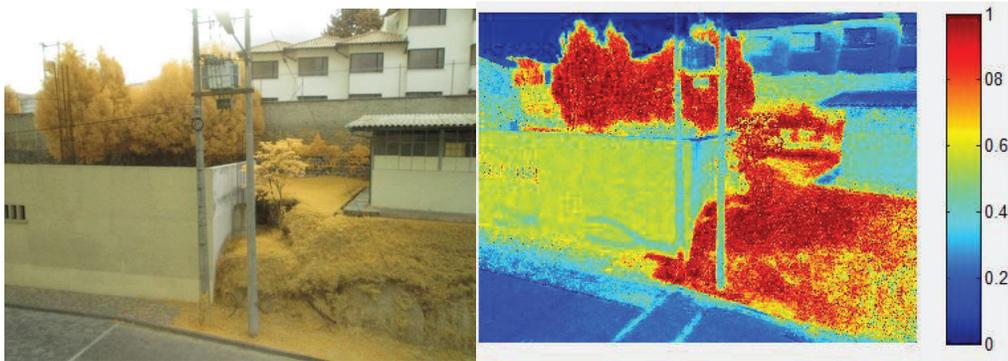


Figura 0.13.- Fotografía multispectral y NDVI exteriores 2

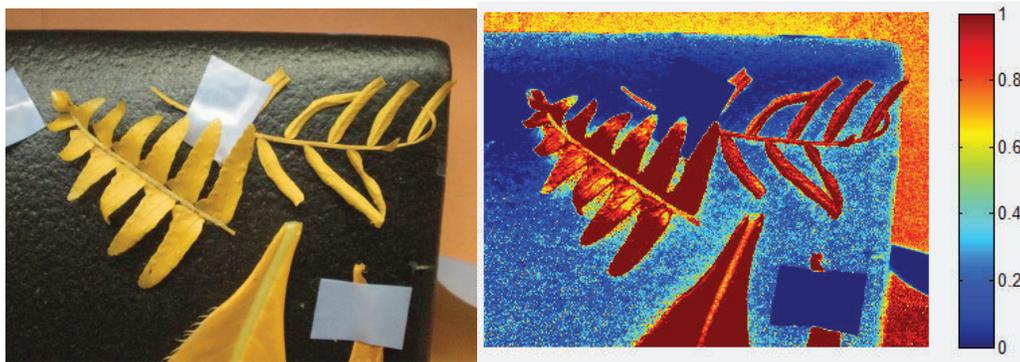


Figura 0.14.- Fotografía multispectral y NDVI hojas

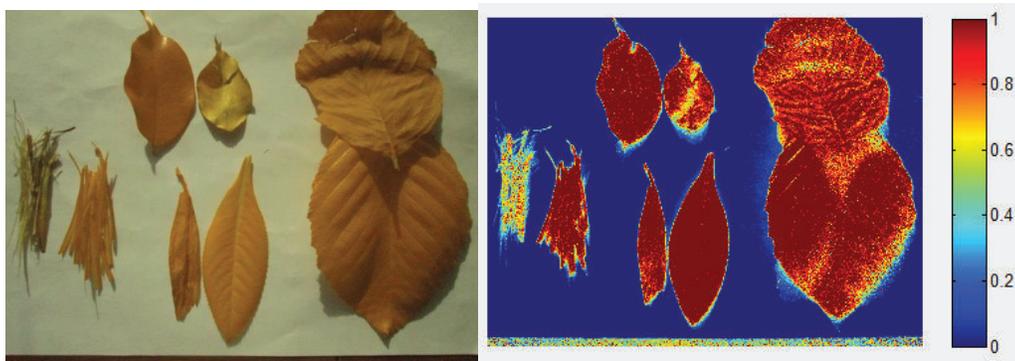


Figura 0.15.- Fotografía multispectral y NDVI hojas 2

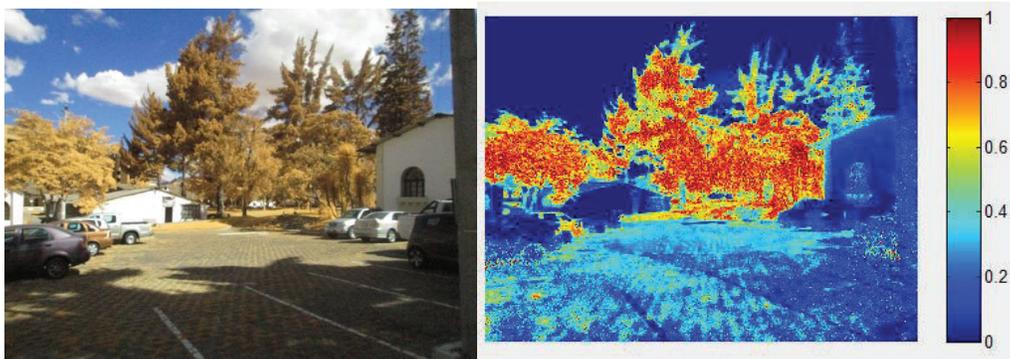


Figura 0.16.- Fotografía multispectral y NDVI parqueadero

4.4 PRUEBA EN PLATAFORMA AÉREA

Para realizar la prueba sobre una plataforma aérea se montó el sistema en un helicóptero *Ecureuil AS350B2* mostrado en la Figura 4.17 y se realizaron varias fotografías a una altura entre 700 a 1200 pies. Con estas imágenes se construyeron mapas utilizando la herramienta Web Mapknighter [65] mostrada en la Figura 4.18.



Figura 0.17.- Helicóptero *Ecureuil AS350B2* usado para las pruebas aéreas.

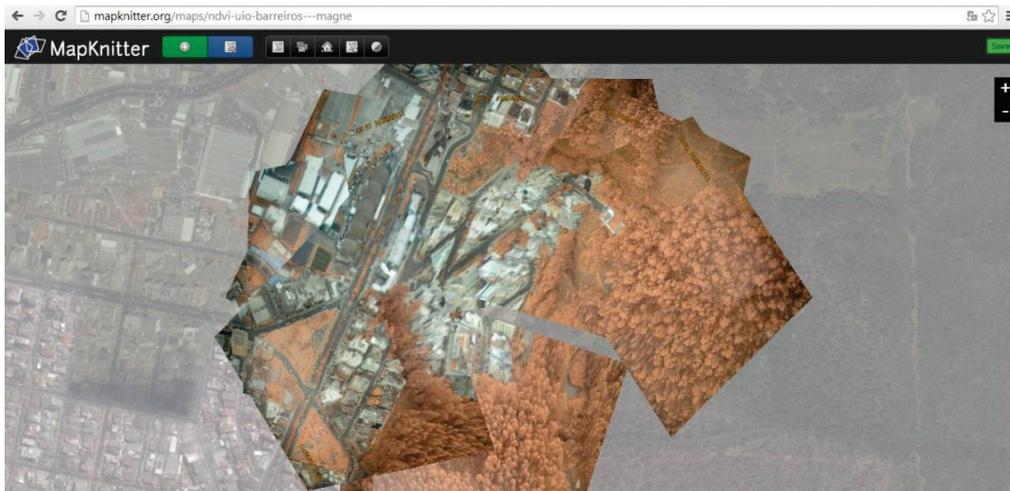
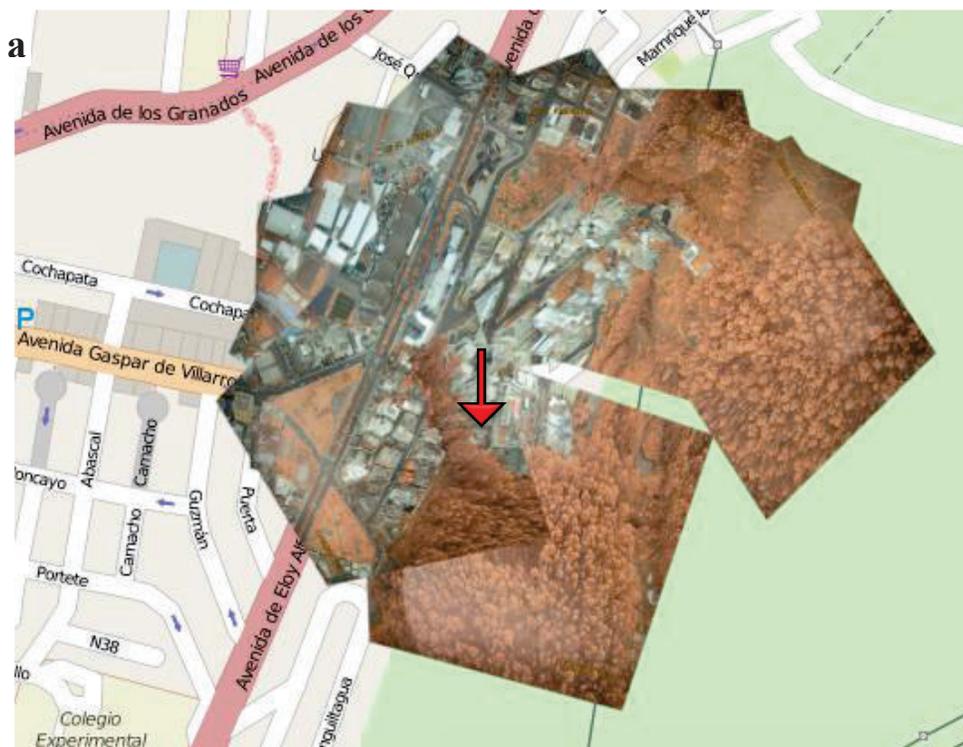


Figura 0.18.- Captura de pantalla Mapknitter

En las Figura 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 se muestran los mapas resultantes en formato multispectral y NDVI con las respectivas referencias GPS:



Latitud, Longitud: -0.171017, -78.468565

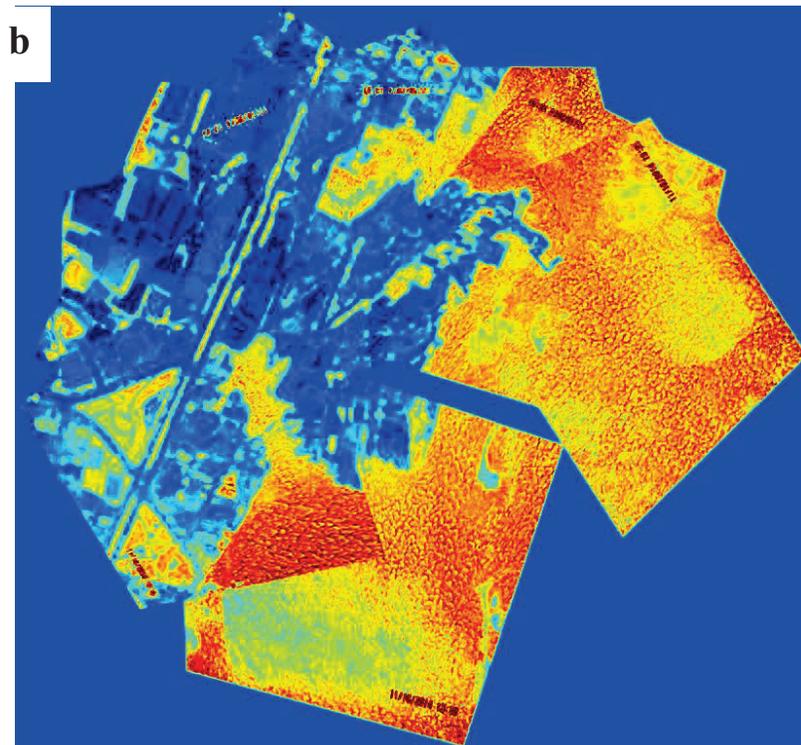
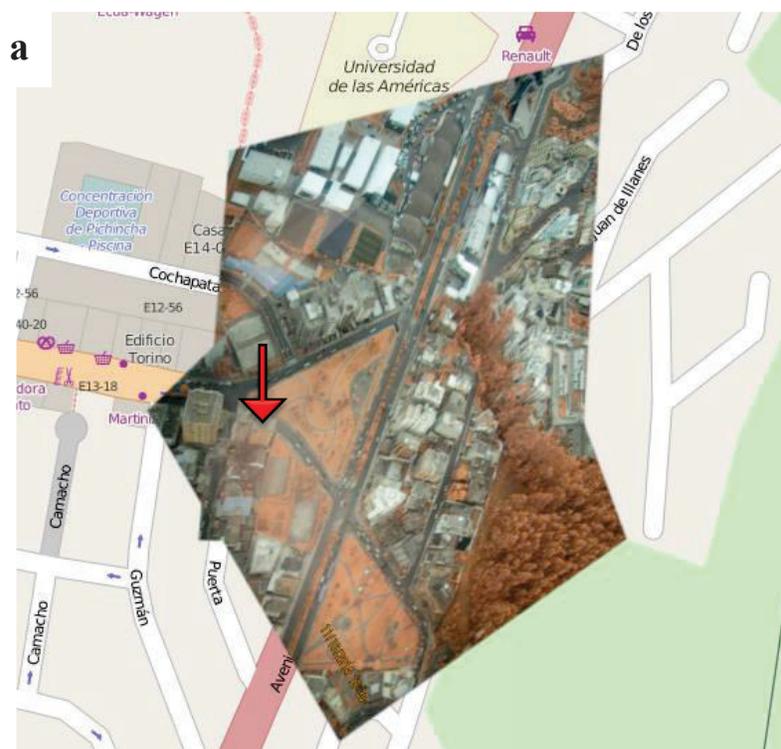


Figura 0.19.- Mapa mutiespectral (a) y NDVI (b)



Latitud, Longitud: -0.171125, -78.471333

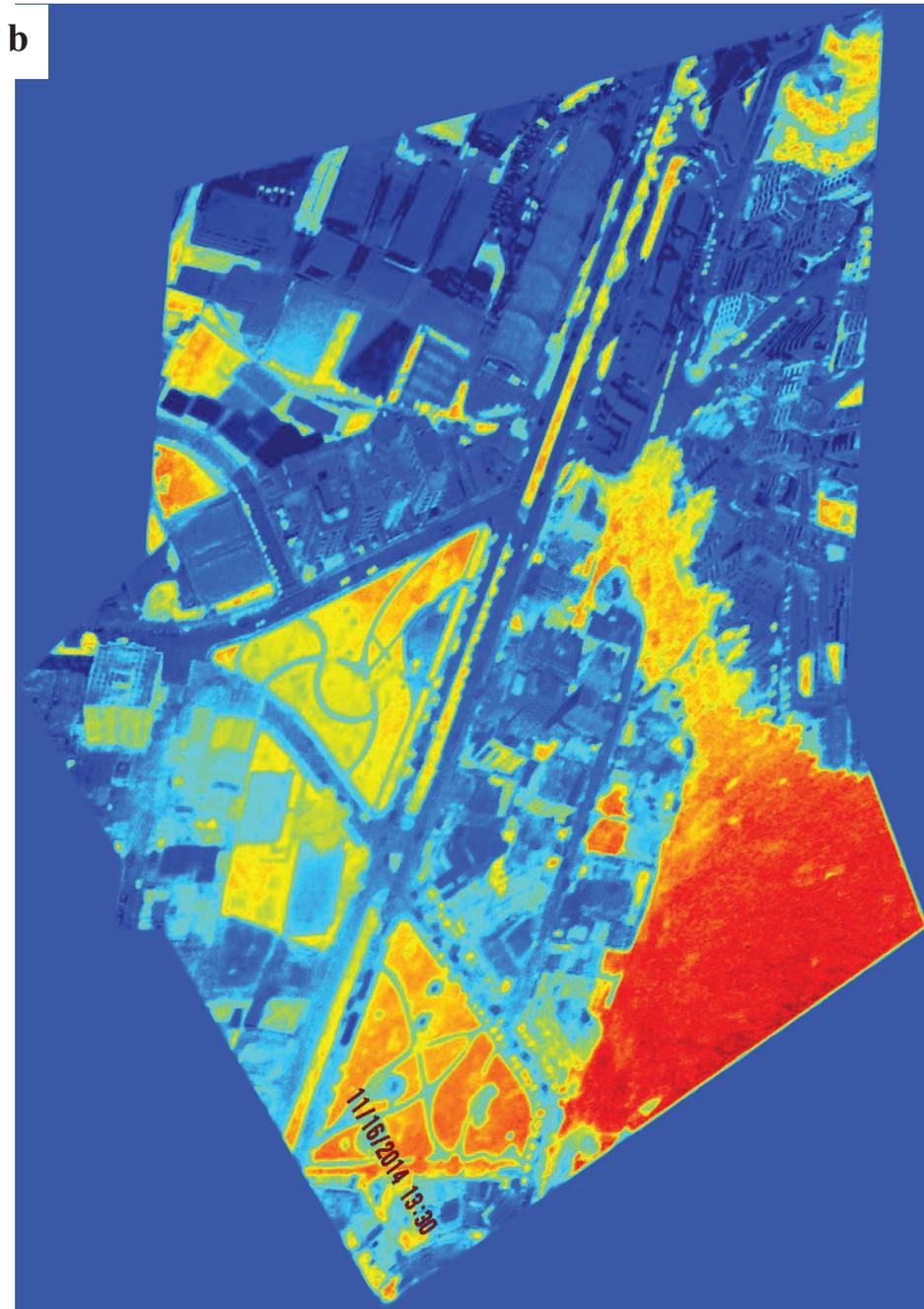
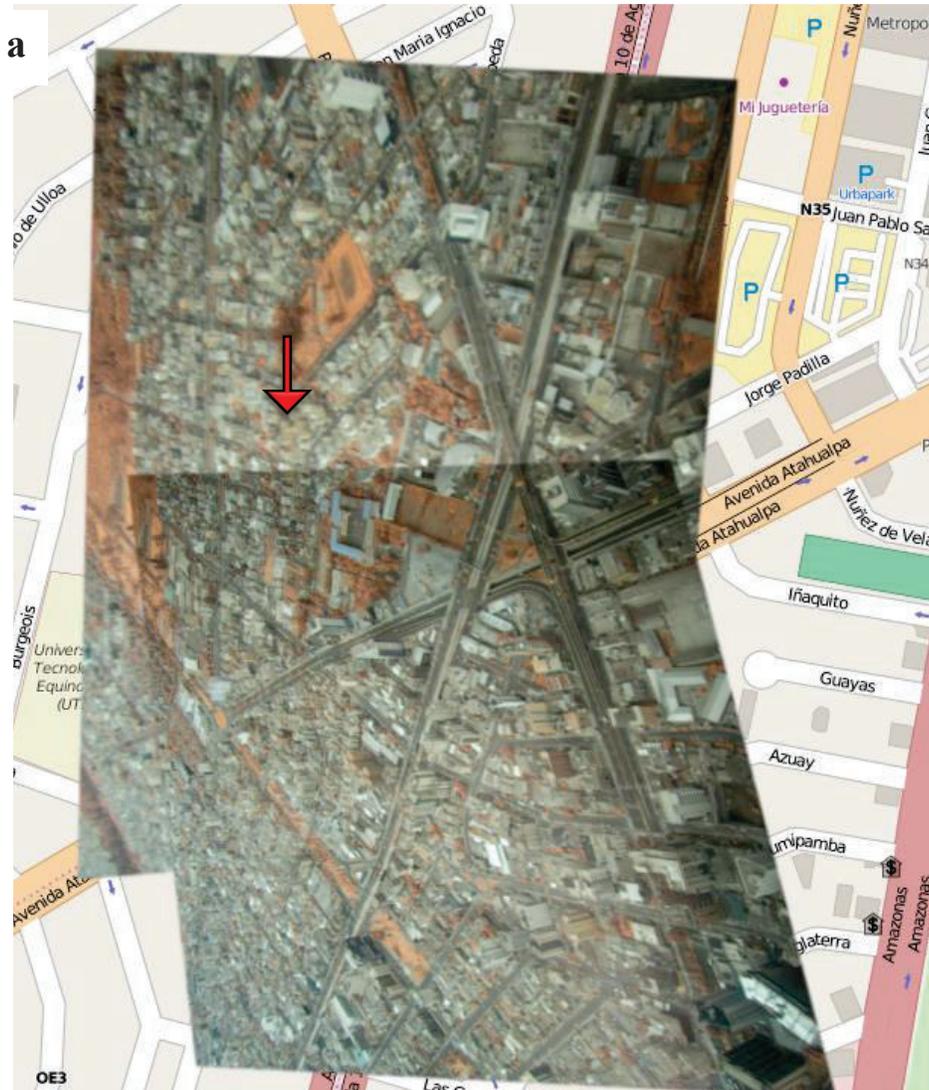


Figura 0.20.- Mapa multiespectral (a) y NDVI (b)



Latitud, Longitud: -0.182454, -78.491310

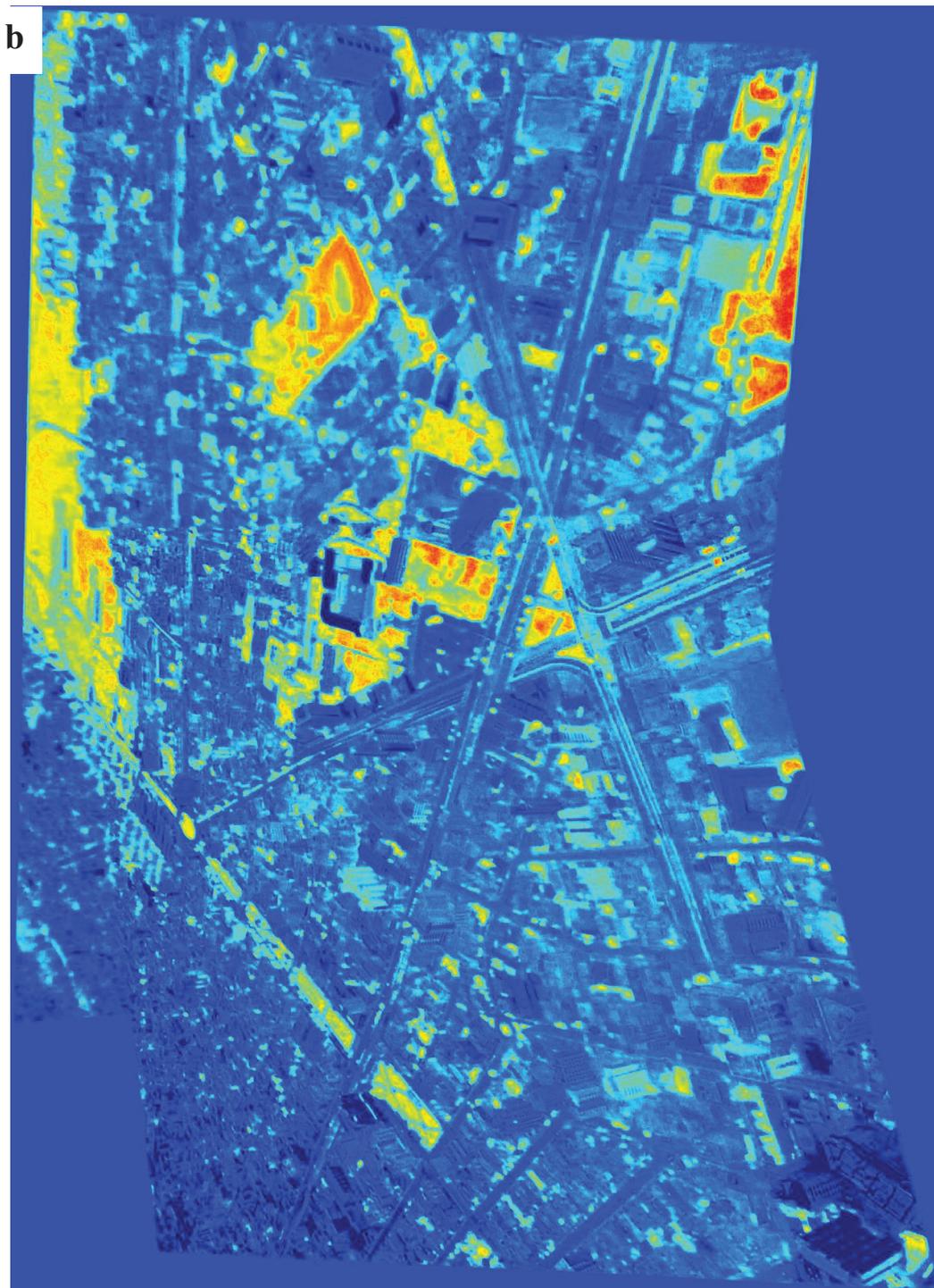
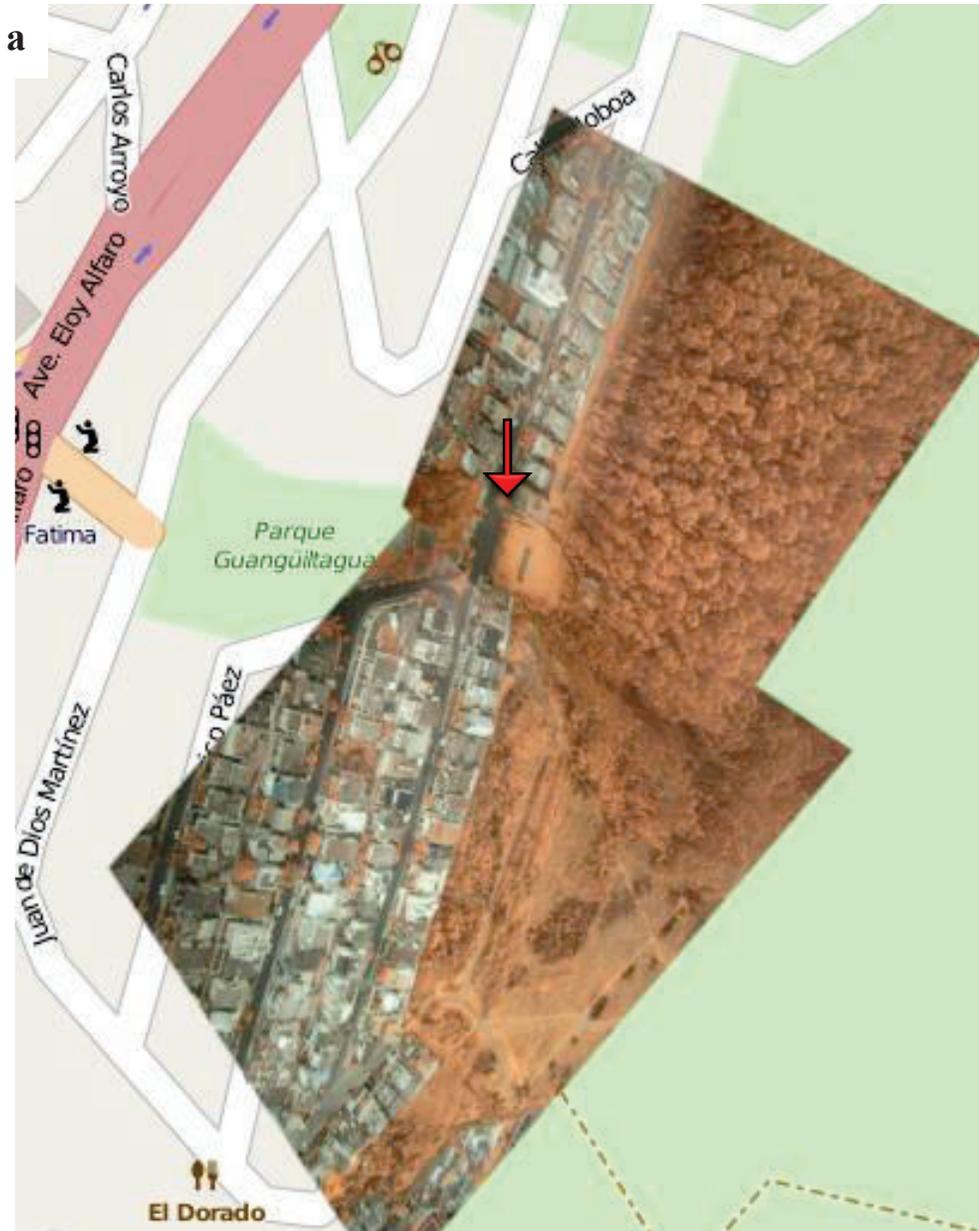


Figura 0.21.- Mapa mutiespectral (a) y NDVI (b)



Latitud, Longitud: -0.182604, -78.472856

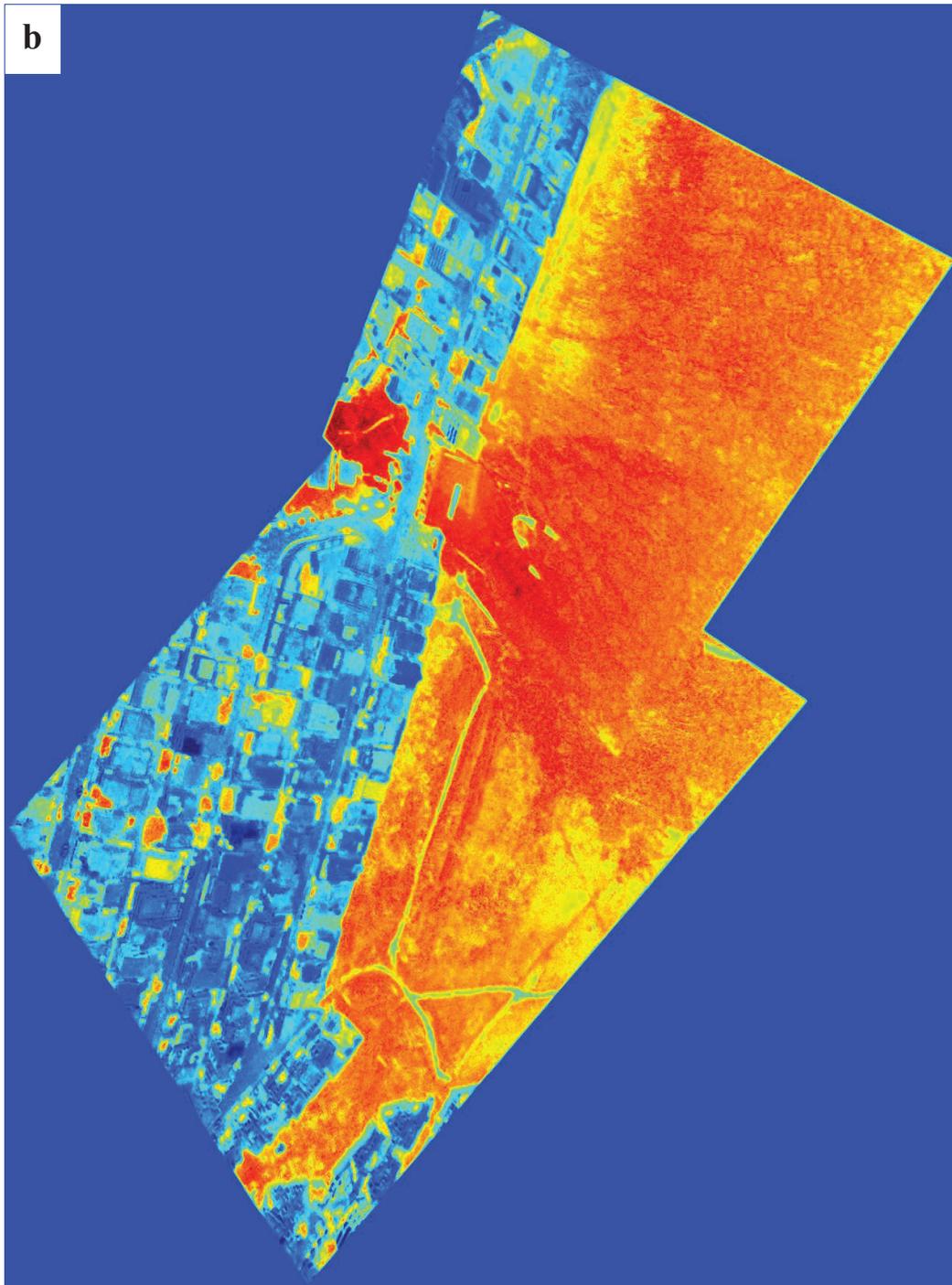
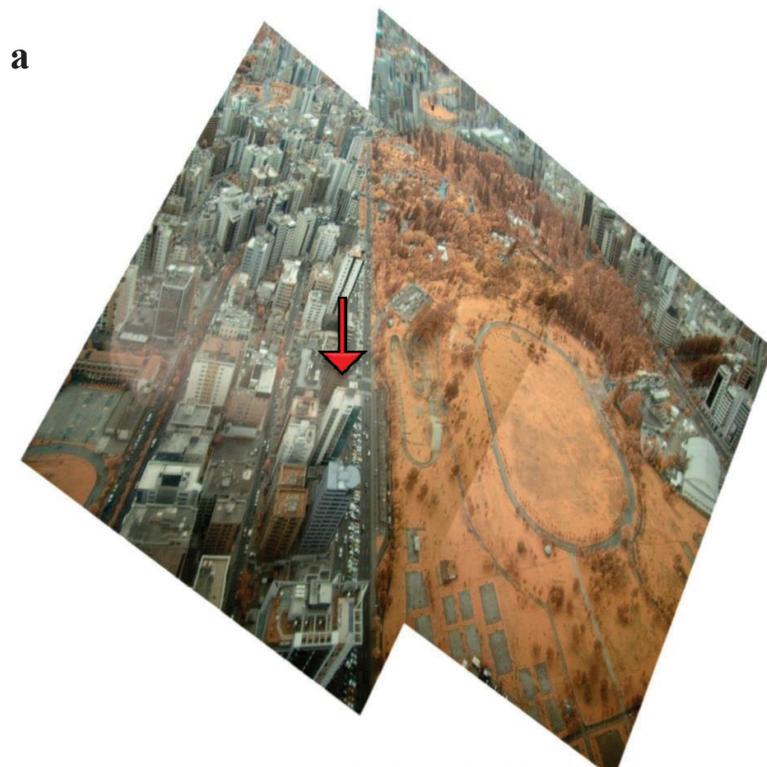


Figura 0.22.- Mapa multiespectral (a) y NDVI (b)



Latitud, Longitud: -0.181017, -78.484882

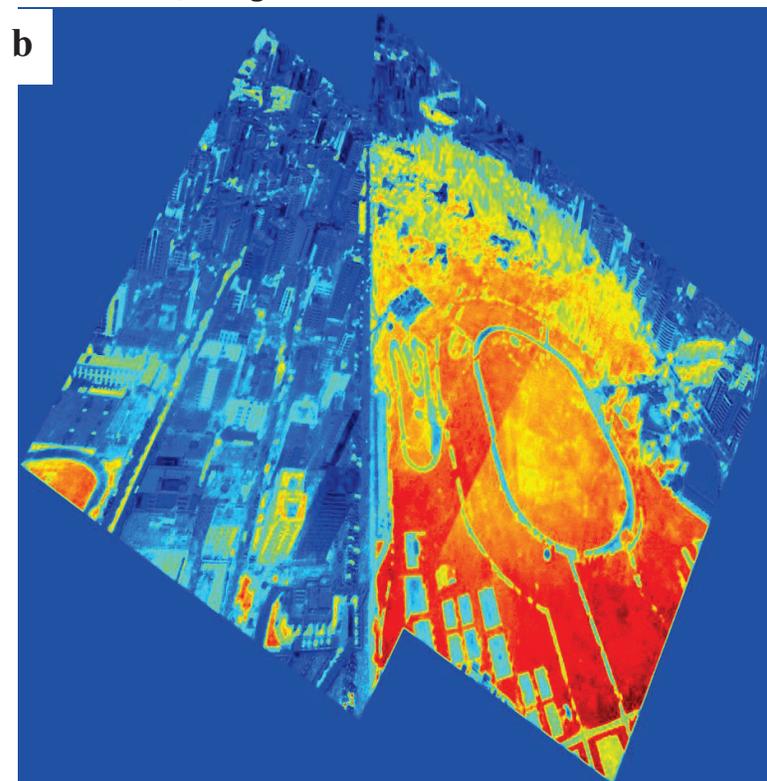


Figura 0.23.- Mapa mutiespectral (a) y NDVI (b)

4.5 RECONOCIMIENTOS

4.5.1 Galardón Nacional 2014, II Concurso de Reconocimiento a la Investigación Universitaria Estudiantil

Mediante el presente proyecto de titulación la Escuela Politécnica Nacional, los Directores y Estudiantes involucrados en este trabajo fueron reconocidos como “Ganador del Galardón Nacional 2014 con Componente Innovación” en el II Concurso de Reconocimiento a la Investigación Universitaria Estudiantil organizado por la Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación SENESCYT el día 27 de Agosto del 2014 luego de superar varios procesos de selección desarrollados en Quito y Guayaquil realizados en fechas anteriores.



Figura 0.24.- Feria Galardón Nacional 2014

4.5.2 2014 IEEE 2014 IEEE Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing – ROPEC XVI

Con la presentación del paper “Multispectral NDVI aerial image system for vegetation analysis by using a consumer camera” que resume el presente proyecto de titulación y habiendo superado el proceso de selección y la presentación oral en el Congreso “2014 IEEE 2014 IEEE Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing – ROPEC XVI” desarrollado en Ixtapa–México del 5 al 7 de Noviembre del 2014; se reconoce a dicho trabajo con una publicación indexada en *IEEEExplore*.

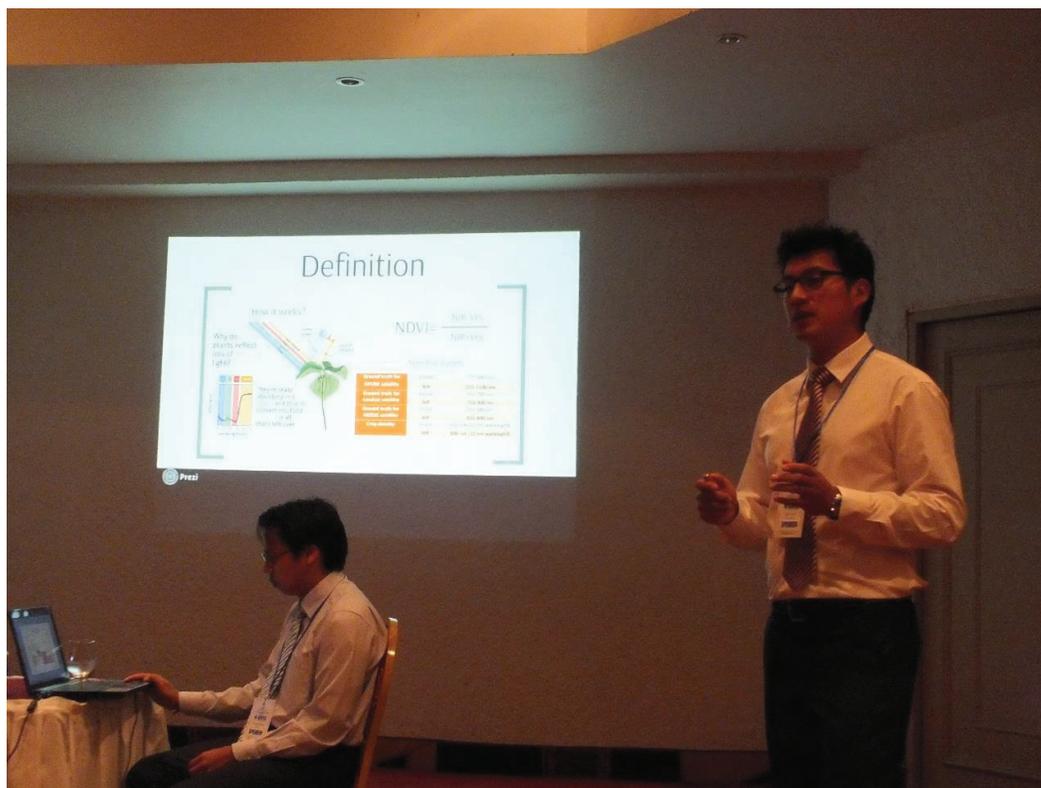


Figura 0.25.- IEEE ROPEC 2014 – México

4.5.3 Feria INNOPOLIS – Yachay 2015

El presente proyecto de titulación fue invitado por la Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación SENESCYT y presentado por sus autores a la feria de innovación INNOPOLIS desarrollada en Yachay Tech ubicado en Urcuqui – Ibarra los días Jueves 15 y Viernes 16 de Enero del 2015.



Figura 0.26.- Feria INNOPOLIS - Yachay

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Tanto las cámaras digitales comerciales como los sensores de captura de imagen en su interior mejoran cada vez más sus características técnicas, siendo más robustas y con sensores de mejor respuesta espectral. En este trabajo se demuestra que dichas cámaras con previas modificaciones tienen la capacidad de tomar fotografías multiespectrales NGB (*Near Infrared, green, blue*).
- El uso de cámaras comerciales modificadas para capturar la reflectancia tanto en el espectro visible como el NIR permite procesar cada pixel de las fotografías mediante NDVI y cuantificar varios parámetros de vegetación como su salud, capacidad fotosintética, densidad, etc. Los resultados estadísticos de las pruebas realizadas después de la calibración con espectrometría son significativos y validan este trabajo.
- Es posible lograr un sistema de sensado remoto NDVI que obtenga imágenes aéreas de bajo costo mediante la modificación de cámaras comerciales con la correcta estabilización, control y comunicación para ser acoplado en plataformas aéreas como UAVs, ultraligeros, globos, etc.
- Mediante el uso de firmware de código abierto es posible controlar de manera remota las funciones de una cámara comercial, de igual manera mediante el uso de dispositivos de estabilización y enlaces de datos es posible controlar la posición de la cámara.
- Reducir los costos de imágenes aéreas multiespectrales permite que se facilite el uso de NDVI en Ecuador para aplicaciones locales, como la verificación de daño de contaminación de bosques y reservas ecológicas,

prevenir sequías en plantaciones, verificación de la restauración ambiental en proyectos de reforestación, control de cultivos, entre otras.

- A fin de mejorar la respuesta del conjunto cámara-filtro se recomienda la fabricación del mismo, bajo las especificaciones que muestre la curva de respuesta del CCD o CMOS, en lugar de usar filtros comerciales ya que esto permitiría mejorar la precisión de corte de las bandas NIR y Visible.
- Se recomienda dotar de una estructura protectora tanto para la cámara como el gimbal a fin de asegurar un buen funcionamiento en las condiciones ambientales presentes en vuelo.
- Para la comunicación de video se recomienda usar un conjunto transmisor-receptor más sofisticado y de mayor potencia a fin de lograr mayores distancias de transmisión y mejor calidad de imagen.
- Se recomienda incorporar de GPS al sistema multiespectral a fin de prescindir totalmente del GPS de la plataforma aérea y brindar una herramienta que facilite la georreferenciación de las imágenes.
- Debido a la gran cantidad de aplicaciones de un sistema NDVI aéreo de bajo costo en Ecuador se recomienda continuar con la investigación con un equipo multidisciplinario que incluya áreas del conocimiento como Biología, Ecología, Agronomía, Mecánica, Ambiental, Instrumentación, etc. a fin de validar, expandir y discutir los resultados del presente sistema.
- Se recomienda expandir la investigación con el desarrollo de software capaz de detectar automáticamente sectores con vegetación deprimida mediante el uso de NDVI y otros indicadores espectrales de vegetación usando imágenes aéreas.

REFERENCIAS

- [1] R. B. F. G. H. P. S. a. A. M. Myneni, «The interpretation of spectral vegetation indexes,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, pp. 481-486, 1995.
- [2] N. E. Observatory, «Measuring Vegetation (NDVI & EVI) MODIS,» 2010. [En línea]. Available: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_4.php.
- [3] Biology Department Duke University, «<http://biology.duke.edu/>,» 2002. [En línea]. Available: <http://biology.duke.edu/bio265/jmu/Applications.htm>.
- [4] J. Verdin, D. Pedreros y G. Eilerts, «Índice de Vegetación Normalizado (NDVI),» *FEWS - Red de Alerta Temprana Contra la Inseguridad Alimentaria*, vol. USGS/EROS Data Center, 2003.
- [5] D. U. Biology Department, Winter 2002. [En línea]. Available: <http://biology.duke.edu/bio265/jmu/BriefDescriptionandHistory.htm>.
- [6] Y. J. Kaufman y D. Tanre, «Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS,» de *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, New York, 1992.
- [7] C. F. Jordan, «Derivation of Leaf Area Index from Quality Measurements of Light on the Forest Floor,» *Ecology*, vol. 50, pp. 663-666, 1969.
- [8] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell y D. W. Deering, «Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS,» de *Third ERTS Symposium, NASA SP-351*, 1973.
- [9] Infragram, « Proyecto Infragram - Kickstarter,» [En línea]. Available: <http://www.kickstarter.com/projects/publiclab/infragram-the-infrared-photography-project>. [Último acceso: 18 Junio 2014].
- [10] SKYE INSTRUMENTS LTD, « <http://www.skyeinstruments.com/>,» [En línea]. Available: <http://www.skyeinstruments.com/wp-content/uploads/Wavelengths-for->

- NDVI-Systems.pdf . [Último acceso: 18 Junio 2014].
- [11] Spectrum Technologies Inc., «FieldScout CM 1000 NDVI Chlorophyll Meter,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.specmeters.com/nutrient-management/chlorophyll-meters/ndvi/cm1000ndvi/>.
- [12] Trimble, «Greenseeker System,» 2014. [En línea]. Available: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-475150/022503-1123-1_GreenSeeker_DS_MarketSmart_USL_0114_LR.pdf.
- [13] S. H. Z. L. G. W. GAN Wenxia, «Normalization of NDVI from Different Sensor System using MODIS Products as Reference,» *35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE35)*, vol. 17, 2014.
- [14] Research group of Photogrammetry and Remote Sensing-Aalto University School of Engineering, «INSTRUMENTIT,» 2014. [En línea]. Available: <http://foto.hut.fi/opetus/350/k04/luento7/luento7.html>.
- [15] Resource Mapping and GIS, «Technical Differences Between the Multispectral and Natural Color Camera Systems,» 2010. [En línea]. Available: http://www.resourcemappinggis.com/image_technical.html.
- [16] Institute of Imaging & Computer Vision (Lehrstuhl für Bildverarbeitung, LfB), Department of Electrical Engineering & Information Technology, RWTH Aachen University, «MULTISPECTRAL TECHNOLOGY,» Enero 2014. [En línea]. Available: <http://www.lfb.rwth-aachen.de/en/research/basic-research/multispectral/>.
- [17] Visions Systems Design, «Multispectral Camera System Speeds Print Inspection,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.vision-systems.com/articles/print/volume-16/issue-7/features/multispectral-camera-system-speeds-print-inspection.html>.
- [18] Satellite Imaging Corporation, «LANDSAT 7 ETM+ Satellite Sensor,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/landsat/>.
- [19] Earth Science - NASA, «LANDSAT 7,» 2014. [En línea]. Available: <http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/l7.html>.
- [20] J. Alvarez, «Using Remote Sensing to Assess Burn Severity, Angora Fire, South Lake Tahoe, CA,» *Remote Sensing, Emporia State University*, 2009.

- [21] VineView, «VineView Scientific Aerial Imaging,» [En línea]. Available: <http://www.vineview.com/rndvi.html>.
- [22] J. Hutton, «Grayhawk Imaging,» [En línea]. Available: <http://www.grayhawk-imaging.com/ndviproducts.html>.
- [23] V. T. A.-O. P. L. J. A. Taylor, «Fiel-Scale model of spatio-temporal vine water status in viticulture system,» *Precision Agriculture*, p. 537, 2009.
- [24] J. Anderson, E. Hardy, J. Roach y R. Witmer, «A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data,» *Geological Survey Professional Paper, Washington DC, USA*, vol. 964, 1976.
- [25] MODIS Landsat Team - Validation, NASA, «General Accuracy Statement,» 2003. [En línea]. Available: <http://landval.gsfc.nasa.gov/ProductStatus.php?ProductID=MOD13>.
- [26] A. Creus, «Metodos de medición,» de *Instrumentos industriales. Su ajuste y calibracion*, marcob, Alfaomega, 1995.
- [27] Teledet, «<http://www.teledet.com.uy>,» 2007.. [En línea]. Available: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/aplicaciones-percepcion-remota.htm>.
- [28] D. O. F. C. Raúl Rivas, «Modelo de predicción de rendimiento de trigo a partir de NDVI: aplicación en el contexto de la agricultura de precisión,» de *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 2011.
- [29] IEEE, «521-1984 IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands,» 1984.
- [30] P. D. N. S. Thomas J. Bruno, *CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts*, CRC Press, 2005.
- [31] D. Liarte, «Xatakafoto,» Diciembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos>.
- [32] S. McHugh, «Cambridge in Colour,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm>.
- [33] S. Imaging, «RGB "Bayer" Color and MicroLenses,» [En línea]. Available: <http://www.siliconimaging.com/RGB%20Bayer.htm>.

- [34] H. Hough, *Satellite Surveillance*, Loompanics Unlimited, 1991.
- [35] C. A. Poynton, «Digital Video and HDTV: Algorithms and Interfaces,» San Francisco , Morgan Kaufmann, 2003, pp. 260, 630.
- [36] D. D. Busch, «Distorsión, aberraciones y anomalías,» de *Instantánea de la fotografía digital Réflex (SLR)*, Paraninfo, 2008, p. 192.
- [37] A. D. Lavín, «Distorsión de lente vs Distorsión de la perspectiva,» 18 11 2009. [En línea]. Available: <http://www.xatakafoto.com/guias/distorsion-de-lente-vs-distorsion-de-la-perspectiva>.
- [38] J. R. Alcocer, «http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/rufino_a_j/,» [En línea]. Available: <http://catarina.udlap.mx>. [Último acceso: 24 04 2014].
- [39] Xsens, «<http://www.xsens.com>,» [En línea]. Available: <http://www.xsens.com/en/company-pages/company/ahrs-attitude-heading-reference-system>.
- [40] E. W. Weisstein, «<http://mathworld.wolfram.com>,» [En línea]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/EulerAngles.html>. [Último acceso: 29 10 2013].
- [41] D. Titterton, de *Strapdown Inertial Navigation Technology*, IET, 2004, p. 258.
- [42] C. P. Clemente, «Caracterización de una unidad de medida inercial,» Universidad Autónoma de Barcelona, Febrero 2012. [En línea]. Available: http://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_210290/PFC_CarlosPrecklerClemente_presentacio.pdf.
- [43] P. Madaan, «<http://www.edn.com/>,» [En línea]. Available: <http://www.edn.com/design/sensors/4406682/1/Brushless-DC-Motors---Part-I--Construction-and-Operating-Principles>. [Último acceso: 09 09 2014].
- [44] Wikipedia, «Zero Order Hold,» 2014. [En línea]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Zero-order_hold.
- [45] D. Tilbury, «Digital Control - NI,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/6463/en/>.
- [46] F. G. Benjamin Kuo, *Automatic Control Systems*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [47] I. a. I. S. d. C. Discretos, «Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática -

- Universidad de Málaga,» [En línea]. Available: [http://www.isa.uma.es/C14/Presentaciones%20de%20Clase%20\(ppt\)/Document%20Library/SISTEMAS%20DE%20CONTROL%20DISCRETOS.pdf](http://www.isa.uma.es/C14/Presentaciones%20de%20Clase%20(ppt)/Document%20Library/SISTEMAS%20DE%20CONTROL%20DISCRETOS.pdf).
- [48] Gorinevsky, «Stanford University,» 2005. [En línea]. Available: http://web.stanford.edu/class/archive/ee/ee392m/ee392m.1056/Lecture11_IMC.pdf.
- [49] M. F. Daniel Rivera, «Control Systems, Robotics and Automation,» de *Encyclopedia of Life Support Systems*, Arizona - USA, p. Vol II.
- [50] J. Swevers, «Internal Model Control,» de *University of Leuven*, Leuven, 2006.
- [51] STM, «STMicroelectronics,» [En línea]. Available: <http://www.st.com/web/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1031/LN1565>. [Último acceso: 26 05 2014].
- [52] CHDK, 2012. [En línea]. Available: <http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK>.
- [53] Public Lab, «<http://publiclab.org>,» [En línea]. Available: <http://publiclab.org/wiki/ndvi>. [Último acceso: 18 Junio 2014].
- [54] W. Nijland, 2010. [En línea]. Available: http://www.ir-photo.net/ir_imaging.html.
- [55] ROSCO, 2009. [En línea]. Available: <http://www.rosco.com/filters/roscolux.cfm>.
- [56] Rcgroups, «<http://www.rcgroups.com>,» Rcgroups, [En línea]. Available: <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=2059104>. [Último acceso: 23 06 2014].
- [57] Arduino, «<http://playground.arduino.cc>,» Arduino, [En línea]. Available: <http://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050>. [Último acceso: 26 05 2014].
- [58] EvvGC 3Stab, «EvvGC,» Enero 2014. [En línea]. Available: <http://evvgc.com/en/evvgc.html>.
- [59] EvvGC, «Github,» 2014. [En línea]. Available: <https://github.com/EvvGC/Firmware>.
- [60] U.S. Department of Transportation-Federal Aviation Administration, «Spectrum Engineering Services - Radio Frequency Bands Supporting Aviation,» 2014. [En línea]. Available: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/spec_management/engineering_office/rfb.cfm.

- [61] 3DRobotics, «5.8 Ghz Light weight Video Transmitter Kit,» 2014. [En línea]. Available: <https://store.3drobotics.com/products/5-dot-8-ghz-light-weight-video-transmitter-kit>.
- [62] NicheOne, «NicheOne-Ebay Store,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ebay.com/itm/PAT-330-2-4GHZ-AV-TV-Wireless-Transmitter-Receiver-Sender-Audio-Video-150m-in-US-/400517012445>.
- [63] RFLinks, «LUV-200S LONG DISTANCE VIDEO SURVEILLANCE SYSTEM,» 2013. [En línea]. Available: <http://rf-links.com/newsite/pdf/luv200s.pdf>.
- [64] Universidad Industrial de Santander, «Modulación de Espectro Disperso por Salto en Frecuencia FHSS,» 2014. [En línea]. Available: <http://ocw.uis.edu.co/ingenieria-electronica/comunicaciones/espectrod/fhss.html>.
- [65] PublicLab, «Mapknitter,» [En línea]. Available: <http://publiclab.org/wiki/mapknitter>. [Último acceso: 21 11 2014].
- [66] L. Koskela, Application of the new production philosophy to construction, Finland: VTT Building Technology, 1992, p. 13.
- [67] A. Hofacker, Rapid lean construction - quality rating model, Manchester: s.n., 2008.
- [68] L. Pére, «luipermom.wordpress.com,» [En línea]. Available: <http://luipermom.wordpress.com/2011/01/02/distorsiones-opticas-en-fotografia/>. [Último acceso: 14 10 2013].
- [69] P. M. Vallejo, «Estadística inferencial: El error típico de la media,» Septiembre 2007. [En línea]. Available: <http://web.upcomillas.es/personal/peter/estadisticabasica/ErrorTipico.pdf>.
- [70] R. G. D. Steel y J. H. Torrie, Principles and Procedures of Statistics with Special Reference to the Biological Sciences, McGraw Hill, 1960.
- [71] A. Colin Cameron, F. A. Windmeijer, H. Gramajo, D. Cane y C. Khosla, «An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models,» *Journal of Econometrics*, nº 77, 1997.
- [72] Decagon Devices, «SPECTRAL REFLECTANCE SENSOR (SRS),» 2013. [En línea]. Available: <http://www.decagon.com/products/canopy-atmosphere/canopy-measurements/srs-spectral-reflectance-sensor-ndvi-pri/>.

- [73] Laboratorio di Geomatica-Politecnico di Milano, «Remote Sensing,» 2011. [En línea]. Available: http://geomatica.como.polimi.it/corsi/remote_sensing/.
- [74] M. Ryan, «UAV Frequency Management Concerns presentation,» de *US UAV Conference*, Washington DC, 2007.
- [75] M.-C. M. V. B. C. L. M.J.A. Butler, «The application of remote sensing technology to marine fisheries: an introductory manual,» *Food and Agriculture Organization of the United Nations Document Repository* , vol. 295, 1988.

ANEXOS

Código de la interfaz gráfica GUI de control y procesamiento de imagen.

Matlab

Visualización y Control

```
function varargout = gui_NDVI(varargin)
% Interface grafica para el modulo multiespectral
% Autores: Jose Barreiros, Nicolas Magne
% Proyecto de titulacion EPN
%%
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @gui_NDVI_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @gui_NDVI_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

%%
% --- Executes just before gui_NDVI is made visible.
function gui_NDVI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
%comunicacion serial puerto
global comserial
comserial='COM1';

%Cambios esteticos a la interface
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
axis off
%foto boton arriba
guidata(hObject, handles);
[a,map]=imread('arriba.png');
[r,c,d]=size(a);
x=ceil(r/30); y=ceil(c/30);
g=a(1:x:end,1:y:end,:);
g(g==255)=5.5*255;
set(handles.Arriba,'CData',g);

%foto boton abajo
guidata(hObject, handles);
```

```

[a,map]=imread('abajob.png');
[r,c,d]=size(a);
x=ceil(r/30); y=ceil(c/30);
g=a(1:x:end,1:y:end,:);
g(g==255)=5.5*255;
set(handles.Abajo,'CData',g);

%foto boton derecha
guidata(hObject, handles);
[a,map]=imread('derecha.png');
[r,c,d]=size(a);
x=ceil(r/30); y=ceil(c/30);
g=a(1:x:end,1:y:end,:);
g(g==255)=5.5*255;
set(handles.Derecha,'CData',g);

%foto boton izquierda
guidata(hObject, handles);
[a,map]=imread('izquierda.png');
[r,c,d]=size(a);
x=ceil(r/30); y=ceil(c/30);
g=a(1:x:end,1:y:end,:);
g(g==255)=5.5*255;
set(handles.Izquierda,'CData',g);

% Choose default command line output for gui_NDVI
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = gui_NDVI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global sw
global video
global video_on

varargout{1} = handles.output;

% demilito que camara voy a usar
try
cam=imqhwinfo('winvideo',1);
% revisa los fomatos compatibles
cam.SupportedFormats;
% activa la camara
video=videoinput('winvideo',1,'YUY2_320x240');
src = getselectedsource(video);

set(video, 'FramesPerTrigger', 1);
set(video, 'TriggerRepeat', Inf);
set(video, 'ReturnedColorSpace', 'rgb');
triggerconfig(video,'manual');
% Comienzo visualizacion
start(video);

```

```

video_on=1;

sw=1;
while sw==1

%% Visualizacion a del NDVI
%Obtener la captura del video
foto = getsnapshot(video);
% Comvierto a fotomato double para no perder valores
fotod=im2double(foto);
% Obtengo el valor del infrarrojo y el visible
NIR_ndvi=fotod(:,:,1);
G_ndvi=fotod(:,:,3);
% Aplica la formula del NDVI
Ndvi_video=((NIR_ndvi-G_ndvi)./(NIR_ndvi+G_ndvi));
% Se realiza en falsos colores
pseudoColoredImage_vid=produce_imagen(Ndvi_video);
guidata(hObject, handles);
imshow(pseudoColoredImage_vid,'Parent',handles.axes6);
axes(handles.Superblue);
colormap(jet);
colorbar('YTickLabel',...
{'0','0.2','0.4','0.6','08','1'})
axis off

guidata(hObject, handles);
imshow(foto,'Parent',handles.Superblue);
axes(handles.Superblue);

axis off
pause(.0005)
end
% en el caso que no pueda acceder al video
catch
disp('No Video');
video_on=0;
end

% --- Executes on button press in AYUDA1.
function AYUDA1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to AYUDA1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global sw
global video
sw=0;
stop(video);
pause(0.5);

close all
set(ayuda,'visible','on');

% --- Executes on button press in SALIRA.

```

```

function SALIRA_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to SALIRA (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global sw
global video
global video_on
sw=0;
%imagreset;
if (video_on==1)
    stop(video);
end
    clc;
    clear;
    close all;

% --- Executes on button press in Procesar.
function Procesar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Procesar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global sw
global video
sw=0;
stop(video);
pause(0.5);

close all
    set(gui_procesamiento,'visible','on');

% --- Executes on button press in AbrirImagen.
function AbrirImagen_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to AbrirImagen (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global filepath
global directorio

% Se selecciona la imagen
[filepath,directorio] = uigetfile;
cd(directorio);
set(handles.text2,'String',filepath);

% --- Executes on button press in Arriba.
function Arriba_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Arriba (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global comserial
try
s = serial(comserial); %assigns the object s to serial port
    set(s,'Baudrate',9600); % se configura la velocidad a 9600 Baudios
    set(s,'StopBits',1); % se configura bit de parada a uno

```

```

        set(s, 'DataBits',8); % se configura que el dato es de 8 bits, debe
estar entre 5 y 8
        set(s, 'Parity', 'none'); % se configura sin paridad
        set(s, 'Terminator', 'CR/LF'); % "c" caracter con que finaliza el envío
        set(s, 'OutputBufferSize',1); % "n" es el número de bytes a enviar
        set(s, 'InputBufferSize' ,1); % "n" es el número de bytes a recibir
        set(s, 'Timeout',2);
fopen(s);
disp('Running');
fwrite(s, 'z');
fwrite(s, 'a');
fclose(s);
catch
disp('No Serial Port');
end

% --- Executes on button press in Izquierda.
function Izquierda_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Izquierda (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global comserial
try
s = serial(comserial); %assigns the object s to serial port
    set(s, 'Baudrate',9600); % se configura la velocidad a 9600 Baudios
    set(s, 'StopBits',1); % se configura bit de parada a uno
    set(s, 'DataBits',8); % se configura que el dato es de 8 bits, debe
estar entre 5 y 8
    set(s, 'Parity', 'none'); % se configura sin paridad
    set(s, 'Terminator', 'CR/LF'); % "c" caracter con que finaliza el envío
    set(s, 'OutputBufferSize',1); % "n" es el número de bytes a enviar
    set(s, 'InputBufferSize' ,1); % "n" es el número de bytes a recibir
    set(s, 'Timeout',2);
fopen(s);
disp('Running');
fwrite(s, 'z');
pause(0.005);
fwrite(s, 'g');
    fclose(s);
catch
disp('No Serial Port');
end

% --- Executes on button press in Abajo.
function Abajo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Abajo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global comserial
% hObject    handle to Abajo (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
try
s = serial(comserial); %assigns the object s to serial port
    set(s, 'Baudrate',9600); % se configura la velocidad a 9600 Baudios
    set(s, 'StopBits',1); % se configura bit de parada a uno

```

```

        set(s, 'DataBits',8); % se configura que el dato es de 8 bits, debe
estar entre 5 y 8
        set(s, 'Parity', 'none'); % se configura sin paridad
        set(s, 'Terminator', 'CR/LF'); % "c" caracter con que finaliza el envío
        set(s, 'OutputBufferSize',1); % "n" es el número de bytes a enviar
        set(s, 'InputBufferSize' ,1); % "n" es el número de bytes a recibir
        set(s, 'Timeout',2);
fopen(s);
disp('Running');
fwrite(s, 'z');
fwrite(s, 'c');
fclose(s);
catch
disp('No Serial Port');
end

% --- Executes on button press in Derecha.
function Derecha_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Derecha (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global comserial
try
s = serial(comserial); %assigns the object s to serial port
    set(s, 'Baudrate',9600); % se configura la velocidad a 9600 Baudios
    set(s, 'StopBits',1); % se configura bit de parada a uno
    set(s, 'DataBits',8); % se configura que el dato es de 8 bits, debe
estar entre 5 y 8
    set(s, 'Parity', 'none'); % se configura sin paridad
    set(s, 'Terminator', 'CR/LF'); % "c" caracter con que finaliza el envío
    set(s, 'OutputBufferSize',1); % "n" es el número de bytes a enviar
    set(s, 'InputBufferSize' ,1); % "n" es el número de bytes a recibir
    set(s, 'Timeout',2);
fopen(s);
disp('Running');
fwrite(s, 'z');
pause(0.005);
fwrite(s, 'e');
fclose(s);
catch
disp('No Serial Port');
end

% --- Executes on button press in Capturar.
function Capturar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Capturar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global video
global video_on
global comserial
% hObject    handle to Capturar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
try
s = serial(comserial); %assigns the object s to serial port
    set(s, 'Baudrate',9600); % se configura la velocidad a 9600 Baudios

```

```

        set(s, 'StopBits',1); % se configura bit de parada a uno
        set(s, 'DataBits',8); % se configura que el dato es de 8 bits, debe
estar entre 5 y 8
        set(s, 'Parity', 'none'); % se configura sin paridad
        set(s, 'Terminator', 'CR/LF'); % "c" caracter con que finaliza el envío
        set(s, 'OutputBufferSize',1); % "n" es el número de bytes a enviar
        set(s, 'InputBufferSize',1); % "n" es el número de bytes a recibir
        set(s, 'Timeout',2);
fopen(s);
disp('Running');
fwrite(s, 'z');
pause(0.005);
fwrite(s, 'l');
fclose(s);
catch
disp('No Serial Port');
end
if (video_on==1)
foto=getsnapshot(video);
guidata(hObject, handles);
imshow(foto, 'Parent', handles.UltimaCaptura);
axes(handles.UltimaCaptura);
axis off

R=foto;
G=foto;
B=foto;
% canal Rojo
R(:, :, 2)=0;
R(:, :, 3)=0;
% canal Green
G(:, :, 1)=0;
G(:, :, 3)=0;
% canal Blue
B(:, :, 2)=0;
B(:, :, 1)=0;
% intercambio de canales
NGB=foto;
NGB(:, :, 3)=foto(:, :, 2);
NGB(:, :, 2)=foto(:, :, 3);

%% obtener el indice NDVI

format long
NIR=double(foto(:, :, 1));
B=double(foto(:, :, 2));
G=double(foto(:, :, 3));
Ndvi=( (NIR-G) ./ (NIR+G) );
pseudoColoredImage=produce_imagen(Ndvi);
% muestro la imagen NDVI
guidata(hObject, handles);
imshow(pseudoColoredImage, 'Parent', handles.NDVI);
axes(handles.NDVI);
colormap(jet);
axis off
x=0:255;

```

```

else
disp('No Video');
end

```

Procesamiento

```

function varargout = gui_procesamiento(varargin)
% GUI_PROCESAMIENTO MATLAB code for gui_procesamiento.fig

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @gui_procesamiento_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @gui_procesamiento_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before gui_procesamiento is made visible.
function gui_procesamiento_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to gui_procesamiento (see VARARGIN)

%% comienzo del codigo
% obtengo el fichero
global filepath
global foto
global pseudoColoredImage
valor1=1;
valor2=1;
guidata(hObject, handles);
% Leo la imagen del Path
foto=imread(filepath);

R=foto*valor1;% canal del infrarojo
G=foto;      % canal del visible verde
B=foto*valor2;% canal del visible azul

```

```

%%muestro la imagen en los colores definidos para mostrar a color

% limpiando GyB canal Rojo
R(:,:,2)=0;
R(:,:,3)=0;
% canal Green
G(:,:,1)=0;
G(:,:,3)=0;
% canal Blue
B(:,:,2)=0;
B(:,:,1)=0;

%% intercambio de canales
NGB=foto;
NGB(:,:,3)=foto(:,:,2);
NGB(:,:,2)=foto(:,:,3);

%% obtener el indice NDVI
fotod=im2double(foto);
NIR=fotod(:,:,1);
visible=fotod(:,:,3);
NIR=NIR*valor1;
visible=visible*valor2;
Ndvi=((NIR-visible)./(NIR+visible));
Ndvi_fx=1.8765*Ndvi+0.1487;% calibracion del ndvi
pseudoColoredImage=produce_imagen(Ndvi_fx);

%% Mostrar en las ventanas
%NIR
guidata(hObject, handles);
image(R, 'Parent', handles.NIR_HD);
axes(handles.NIR_HD);
axis off
%SUPERBLUE
guidata(hObject, handles);
image(foto, 'Parent', handles.SuperBlue_HD);
axes(handles.SuperBlue_HD);
axis off
%VISIBLE
guidata(hObject, handles);
image(B, 'Parent', handles.Visible_HD);
axes(handles.Visible_HD);
axis off
%NRG
guidata(hObject, handles);
image(NGB, 'Parent', handles.NGB_HD);
axes(handles.NGB_HD);
axis off
%NDVI HD
guidata(hObject, handles);
imshow(pseudoColoredImage, 'Parent', handles.NDVI_HD);
axes(handles.NDVI_HD);
colormap(jet);
colorbar('YTickLabel',...
{'0', '0.1', '0.2', '0.3', '0.4', '0.5', '0.6', '0.7', '0.8', '0.9', '1'})

```

```

axis off

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = gui_procesamiento_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject     handle to figure
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

handles.output = hObject;

% Update handles structure

varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in Regresar.
function Regresar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to Regresar (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

close all;
pause(0.05);
set(gui_NDVI, 'visible', 'on');
clc

% --- Executes on button press in Guardar.
function Guardar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to Guardar (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
global pseudoColoredImage
X=gray2ind(pseudoColoredImage,256);
image = ind2rgb(X,colormap(jet)) ;

fullFileName = fullfile(sprintf('NDVI %s.jpg', datestr(now,30)));
imwrite(image,fullFileName);

```

Código del gestor de comunicaciones.

Arduino

```

#include <Servo.h>

Servo servo1;
Servo servo2;

//min 50 max130 medio 95

int val_pitch=92; // variable to read the value from the analog pin
int val_yaw=92;
int Aux2;

```

```
int tiempo=200;
int led = 9;
void setup() {
  servo1.attach(10);
  servo2.attach(11);
  pinMode(led, OUTPUT);
  // initialize serial:
  Serial.begin(9600);
  delay(2500);
}
void loop() {
  servo1.write(92);
  servo2.write(92);
  digitalWrite(led,LOW);
  delay(200);          // waits for the servo to get there
}
void serialEvent() {
  while (Serial.available()) {
//inicio de comunicacion
    int Aux = (int)Serial.read();
    if (Aux=='z'){
      delay(50)
      int Aux2 = (int)Serial.read()
      if (Aux2=='1'){
        Serial.write('1');
        digitalWrite(led, HIGH);
        delay(2000);
        digitalWrite(led,LOW);
      }
    }
    else if (Aux2=='a'){
      Serial.write('a');
      servo1.write(120);
      delay(tiempo);
    }
    else if (Aux2=='c'){
      Serial.write('c');
      servo1.write(70);
      delay(tiempo);
    }
  }
}
```

```
}  
  else if (Aux2=='e'){  
    Serial.write('e');  
    servo2.write(120);  
    delay(tiempo);  
  }  
  else if (Aux2=='g'){  
    Serial.write('g');  
    servo2.write(70);  
    delay(tiempo);  
  }  
  else  
  {  
  }  
}  
}  
}
```