



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA  
TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA  
Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO  
AMBIENTE**

**TEMA: ANÁLISIS DE *NDVI* CONTRASTANDO DIFERENTES  
METODOLOGÍAS DE TOMA DE DATOS ESPECTRALES, EN  
CULTIVOS DE PASTOS EN ETAPA PREVIA A PASTOREO**

**AUTORES: ANDRADE SUÁREZ BRYAN ISRAEL  
MONCAYO CEVALLOS LUIS NICOLÁS**

**DIRECTOR: SINDE GONZÁLEZ IZAR**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## **DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**

### **CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

#### **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**ANÁLISIS DE NDVI CONTRASTANDO DIFERENTES METODOLOGÍAS DE TOMA DE DATOS ESPECTRALES, EN CULTIVOS DE PASTOS EN ETAPA PREVIO PASTOREO**” realizado por los señores **ANDRADE SUÁREZ BRYAN ISABEL** y **MONCAYO CEVALLOS LUIS NICOLÁS**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **ANDRADE SUÁREZ BRYAN ISABEL** y **MONCAYO CEVALLOS LUIS NICOLÁS** para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 6 de junio del 2017**

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del director, Izar Sinde González.

-----  
**IZAR SINDE GONZÁLEZ**  
**DIRECTOR**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

### CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **ANDRADE SUÁREZ BRYAN ISABEL**, con cédula de identidad N° 171970068-2 y **MONCAYO CEVALLOS LUIS NICOLÁS**, con cédula de identidad N° 171900026-5, declaramos que este trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE NDVI CONTRASTANDO DIFERENTES METODOLOGÍAS DE TOMA DE DATOS ESPECTRALES, EN CULTIVOS DE PASTOS EN ETAPA PREVIO PASTOREO**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 6 de junio del 2017

-----  
Bryan Isael Andrade Suárez

-----  
Luis Nicolás Moncayo Cevallos

CC. 171970068-2

CC. 171900026-5



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

### CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

#### AUTORIZACIÓN

Nosotros, **ANDRADE SUÁREZ BRYAN ISRAEL** y **MONCAYO CEVALLOS LUIS NICOLÁS**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE NDVI CONTRASTANDO DIFERENTES METODOLOGÍAS DE TOMA DE DATOS ESPECTRALES, EN CULTIVOS DE PASTOS EN ETAPA PREVIO PASTOREO**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 6 de junio del 2017

-----  
Bryan Isael Andrade Suárez

-----  
Luis Nicolás Moncayo Cevallos

CC. 171970068-2

CC. 171900026-5

## DEDICATORIA

El fruto de este trabajo se lo dedico de manera especial a mis padres Chela y Franklin quiénes me han formado con valores, honestidad y humildad. Que con su esfuerzo me han ofrecido lo mejor cada día, les prometo que nunca olvidaré todo el amor y la confianza que han depositado en mí, mi carrera profesional será también de ustedes, gracias eternas.

A mi hermana Doménica que con su sencillez me ha transformado, que gran parte de esto es por ti, a pesar de peleas o tristeza perdure el amor entre nosotros, siempre serás el motor de mi vida.

A mis tías, tíos, primos y primas; que en distintas condiciones han sabido apoyarme en su momento, que a pesar de la distancia que existe con algunos de ellos siempre han estado pendientes de mí, enseñándome que el cariño y apoyo en familia es incondicional.

A mis amigas Karen y Paty, que sin ustedes este camino habría sido mucho más difícil, por todos esos trabajos y momentos compartidos, que se han transformado en una amistad única y desinteresada.

A todos mis amigos y compañeros de clase que en estos años he conocido y he compartido grandiosos momentos, en especial a Nicolás por compartir este largo proyecto, ayudarme a cumplir las metas que nos hemos propuesto y ser un buen amigo, a los Bracos enseñarme que los amigos son para las buenas y las malas.

*Bryan Andrade Suárez*

## **DEDICATORIA**

Este proyecto va dedicado primordialmente a mi familia, posteriormente a todos lo que agradeceré a continuación y finalmente al ser vivo que le sirva esta investigación.

*Nicolás Moncayo*

## AGRADECIMIENTO

Primero quiero agradecer a Dios por ser un pilar fundamental en mi vida y darme el regalo de la vida y la salud para mi familia y para mí, a mi Lolita querida que cada día la tengo presente y me recuerda que tengo *que ser más para servir mejor*.

Quiero agradecer a mis padres y a mi hermana por ser un ejemplo de vida, enseñarme a que el amor de la familia está sobre cualquier cosa y que simplemente sin el apoyo de ellos no hubiera logrado cada meta que me he propuesto en la vida, que cada paso que doy sea de orgullo para ustedes.

A Cristy, Sandry, Pato porque siempre me han brindado su apoyo y han encontrado en cada momento las palabras precisas para darme fortaleza a pesar de la gran distancia que hay ahora.

A todos mis tíos y primos que por obvias razones no puedo enumerarlos, pero que con cada uno he sentido el cariño de familia y enseñarme el significado de una gran familia incondicional y desinteresada.

A todos mis maestros e incluso amigos de la carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, por compartir sus conocimientos y enseñarme que para ser un profesional primero hay que aprender a ser persona.

A mi director de tesis Izar de igual manera a Cesar por apoyarme en este proyecto, siendo unos estupendos tutores y desde luego poder compartir los frutos de esta investigación.

A las personas del Instituto Espacial Ecuatoriano, en especial a Javier y José Luis por ese ánimo y apoyo brindado y a Agustín y Leónidas gracias a su apoyo, que sin ustedes este proyecto no se hubiera logrado.

*Bryan Andrade Suárez*

## AGRADECIMIENTOS

A Alicia Edelmira Cevallos Hernández, Luis Rodrigo Moncayo Núñez y Carla Estefanía Moncayo Cevallos, que me han apoyado y aguantado en los 25, casi 26 años, de existencia de este ser. Gracias infinitas.

Al Equipo que Trabaja con todos los miembros que han pasado por el mismo a lo largo del tiempo, en especial a Henry y Miguel, por todos los trabajos, eventos sociales y enseñarme a trabajar en equipo a lo largo de la vida universitaria.

Al Club Social, Deportivo y Cultural Bracos con todos sus miembros que han participado en los distintos eventos sociales, deportivos y culturales que han hecho amenas las actividades extracurriculares.

Al curso con el que egrese por tener con quien distraerme en ciertas materias en las que se requería, por tener a quien molestar cuando se necesitaba, en definitiva, por ayudar en los estudios.

Al Club Deportivo Macará por las alegrías efímeras que dan un toque de realidad a la vida.

Al Instituto Espacial Ecuatoriano por el apoyo en la investigación, en especial Javier y a José Luis.

A mi director de tesis Izar de igual manera a Cesar por el apoyo en este proyecto.

A todos los que conforman la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y en especial a la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, muchas gracias por los conocimientos impartidos.

*Nicolás Moncayo*



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    Antecedentes .....	1
1.2    Definición del problema .....	2
1.3    Justificación .....	3
1.4    Área de Estudio.....	4
1.4.1    Área de Influencia.....	4
1.4.2    Localización Geográfica .....	5
1.4.3    Descripción del Área de Estudio.....	5
1.5    Objetivos .....	6
1.5.1    Objetivo General.....	6
1.5.2    Objetivos Específicos.....	6
1.6    Metas del Proyecto.....	7
 CAPÍTULO II .....	 9
2. FUNDAMENTO TEÓRICO .....	9
2.1    Análisis Espectral.....	9
2.1.1    Sensores Espectrales .....	10
2.1.2    Clasificación de sensores espectrales.....	10
2.1.3    Firma Espectral .....	11
2.1.4    Imagen Digital .....	12
2.2    Índices de Vegetación .....	14
2.2.1    Índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI.....	15
2.3    Fotogrametría.....	15
2.3.1    Fotogrametría Aérea .....	16
2.3.2    Fotogrametría Digital.....	16
2.3.3    Aplicaciones de la fotogrametría .....	17
2.4    Sistema Aéreo No Tripulado .....	17

2.4.1	Vehículos Aéreos No Tripulados.....	18
2.4.2	DJI Matrice 100 Cuadrapter.....	18
2.4.3	Sensor Multiespectral Parrot Sequoia.....	21
2.4.4	Puntos de control terrestre.....	23
2.4.5	Plan de Vuelo.....	23
2.4.6	Software de Procesamiento.....	24
2.4.6.1	Trimble Business Center.....	24
2.4.6.2	Pix4D.....	24
2.5	Espectrometría.....	25
2.5.1	Espectrorradiómetro FieldSpec 4.....	25
2.5.2	Software de Procesamiento.....	26
2.5.2.1	RS <sup>3</sup> .....	26
2.5.2.2	ViewSpecPro.....	26
2.6	Agricultura de Precisión AP.....	26
2.6.1	Inicios de la Agricultura de Precisión.....	27
2.6.2	Equipos para Agricultura de Precisión.....	27
2.6.2.1	Sistema de localización GPS.....	27
2.6.2.2	Captadores de información agrícola.....	28
2.6.2.3	Sensores Remotos.....	28
2.6.2.4	Sistemas de información geográfica (SIG).....	28
2.7	Estadística Espacial.....	29
2.7.1	Definiciones.....	29
2.7.2	Geoestadística.....	29
2.7.3	Lattices.....	29
2.7.4	Patrones espaciales.....	30
2.8	Análisis exploratorio de datos.....	30
2.8.1	Introducción.....	30
2.8.2	Gráficos exploratorios.....	30
2.9	Análisis estructural.....	31
2.9.1	Un enfoque estocástico para la variación espacial.....	31
2.9.2	Teoría geoestadística y variables regionalizadas.....	31
2.9.3	Estacionariedad.....	32

2.9.4	Estimación del variograma .....	33
2.9.4.1	Características del Variograma .....	34
2.9.5	Nube variográfica.....	36
2.9.6	Modelamiento del variograma .....	36
2.9.6.1	Modelo de Independencia (Nugget Effect) .....	37
2.9.6.2	Modelo Exponencial .....	37
2.9.6.3	Modelo esférico .....	38
2.9.6.4	Modelo Gaussiano .....	39
2.9.6.5	Modelo Gamma .....	39
2.10	Predicción espacial.....	41
2.10.1	Predicción espacial óptima .....	41
2.10.2	Características generales del Kriging.....	41
2.10.2.1	Kriging ordinario para mapeo .....	42
2.10.2.2	Pesos Kriging .....	45
2.10.2.3	Validación cruzada.....	45
2.10.3	Verificación del Modelo .....	46
CAPÍTULO III .....		47
3.	METODOLOGÍA .....	47
3.1	Generalidades.....	47
3.1.1	Materiales.....	48
3.1.2	Métodos.....	48
3.1.2.1	Fotogrametría.....	48
3.1.2.2	FastStatic.....	48
3.1.2.3	RTK.....	49
3.1.2.4	Replanteo RTK .....	49
3.1.2.5	Colección de datos espectrales (Espectrorradiómetro) .....	49
3.1.2.6	Geoestadística .....	49
3.2	Levantamiento de información con UAV (Fase 1).....	50
3.2.1	Plan de vuelo.....	51
3.2.2	Puntos de control fotogramétrico.....	52
3.2.3	Captura de información.....	53
3.2.4	Ajuste del proyecto fotogramétrico .....	54

3.2.4.1	Corrección geométrica .....	54
3.2.4.2	Corrección atmosférica .....	55
3.2.5	Generación del ortofotomosaico .....	56
3.2.6	Cálculo del Modelo NDVI (1) .....	57
3.3	Validación de sensores espectrales (Fase 2) .....	57
3.3.1	Análisis de datos en laboratorio .....	57
3.3.1.1	Selección de muestras .....	57
3.3.1.2	Condiciones controladas de laboratorio .....	58
3.3.1.3	Recolección de datos (Parrot Sequoia) .....	58
3.3.1.4	Recolección de datos (FieldSpec4) .....	59
3.3.1.5	Procesamiento de datos espectrales .....	61
3.3.1.6	Verificación y análisis de datos .....	65
3.3.2	Análisis de datos en campo .....	66
3.3.2.1	Modelo de muestreo .....	66
3.3.2.2	Replanteo RTK y captura de información .....	67
3.3.2.3	Cálculo de NDVI para cada punto .....	69
3.4	Muestreo en campo y modelo geoestadístico (Fase 3) .....	70
3.4.1	Generar modelo geoestadístico, Modelo NDVI (2) .....	70
3.5	Análisis y comparación de datos (Fase 4) .....	71
3.5.1	Evaluación de los modelos con puntos de validación .....	72
3.5.2	Comparación entre modelos de NDVI .....	72
CAPÍTULO IV .....		74
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		74
4.1	Modelo NDVI obtenido por UAV .....	74
4.1.1	Puntos de control fotogramétrico GCP .....	74
4.1.2	Ortofotomosaicos .....	75
4.1.2.1	Ortofotomosaico RGB .....	75
4.1.2.2	Ortofotomosaicos Multiespectrales .....	75
4.1.3	Modelo NDVI (1) .....	77
4.2	Comparación entre valores de NDVI de los sensores espectrales .....	78
4.2.1	Validación en laboratorio .....	78

4.2.2	Validación en campo.....	79
4.2.2.1	Coordenadas de puntos de muestreo.....	79
4.2.2.2	Captura de datos y procesamiento inicial .....	82
4.2.2.3	NDVI por cada punto.....	85
4.2.2.4	Verificación y análisis de datos .....	86
4.3	Modelo geoestadístico, modelo NDVI (2).....	87
4.3.1	Modelo geoestadístico de NDVI.....	87
4.3.1.1	Análisis exploratorio de datos.....	87
4.3.1.2	Variograma Experimental.....	90
4.3.1.3	Nube Variográfica.....	91
4.3.1.4	Ajuste del variograma a un modelo teórico .....	92
4.3.1.5	Validación cruzada.....	93
4.3.1.6	Predicción .....	94
4.4	Análisis y comparación de modelos resultantes .....	98
4.4.1	Verificación de los modelos de NDVI con los puntos de validación .....	98
4.4.2	Análisis de correlación entre los modelos de NDVI (1) y (2) .....	98
	CAPÍTULO V .....	100
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	100
5.1	Conclusiones .....	100
5.2	Recomendaciones .....	102
	BIBLIOGRAFÍA .....	104
	ANEXOS .....	108

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores digitales de una imagen de 8 bits.....	13
Tabla 2 Especificaciones técnicas del sensor Parrot Sequoia .....	23
Tabla 3 Parámetros iniciales y resultantes del plan de vuelo.....	51
Tabla 4 Muestras seleccionadas para muestreo en laboratorio. ....	57
Tabla 5 Altura de captura en función al tamaño del objeto y el FOV .....	59
Tabla 6 Resumen del reporte de Coordenadas .....	67
Tabla 7 NDVI de puntos muestreados con el sensor FieldSpec4 .....	69
Tabla 8 Tipos de Correlación en función del valor $\sigma$ .....	73
Tabla 9 Bondad del ajuste en función del valor $\sigma^2$ .....	73
Tabla 10 Coordenadas de la base utilizada para posicionamiento de los GCP.....	74
Tabla 11 Diferencias de NDVI obtenido con los dos sensores.....	79
Tabla 12 Coordenadas de los puntos de muestreo .....	80
Tabla 13 Ejemplo de puntos con su valor de NDVI .....	85
Tabla 14 Resumen estadístico de diferencias entre sensores .....	86
Tabla 15 Resumen estadístico .....	88
Tabla 16 Resumen estadístico de verificación de los modelos .....	98

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1, Mapa de uso y cobertura de suelo de los cantones Rumiñahui y Mejía.....	4
Figura 2, Mapa de Ubicación .....	5
Figura 3, Clasificación del espectro electromagnético .....	9
Figura 4, Firma espectral, respecto al área foliar. ....	12
Figura 5, Coordenadas de la Imagen Digital.....	12
Figura 6, Imagen digital monobanda de cancha de básquet en el IASA, y ampliación de pixeles.....	13
Figura 7, Imagen Digital RGB. ....	14
Figura 8, DJI Matrice 100 .....	18
Figura 9, Componentes del M100.....	19
Figura 10, Sensor Zenmuse X3 con Gimbal .....	20
Figura 11, Radio Control DJI Matrice 100 .....	21
Figura 12, Sensor multispectral y sensor de luz solar Parrot Sequoia .....	22
Figura 13, Interfaz Trimble Business Center 3.50 .....	24
Figura 14, Espectrorradiómetro FieldSpec4 Hi-Res .....	25
Figura 15, Parámetros del variograma .....	35
Figura 16, Modelo de Independencia.....	37
Figura 17, Modelo Exponencial.....	38
Figura 18, Modelo Esférico.....	39
Figura 19, Modelo Gaussiano .....	39
Figura 20, Modelo Gamma .....	40
Figura 21, Diagrama de flujo de la metodología del proyecto.....	50
Figura 22, Plan de vuelo en el software Mission Planner .....	52
Figura 23, Distribución de puntos de control fotogramétrico .....	53
Figura 24, Corrección geométrica mediante GCP .....	55
Figura 25, Calibración atmosférica mediante valores de albedo del panel AIRINOV .....	56
Figura 26, Interfaz HTML de configuración Parrot Sequoia.....	59
Figura 27, Interfaz RS <sup>3</sup> .....	61
Figura 28, Spectralon de la firma ASD Inc.....	61

Figura 29, Archivos brutos del sensor Parrot Sequoia.....	62
Figura 30, NDVI de una muestra analizada en laboratorio.....	63
Figura 31, Respuesta espectral de una muestra de pasto .....	64
Figura 32, Cálculo NDVI de los datos del sensor FieldSpec 4.....	65
Figura 33, Software R .....	66
Figura 34, Distribución de puntos en software R.....	67
Figura 35, Puntos en Colectora .....	68
Figura 36, Captura de información y replanteo .....	68
Figura 37, Tabla ingresada en R .....	69
Figura 38, Software R .....	70
Figura 39, Ortofoto RGB obtenida mediante UAV .....	75
Figura 40, Ortomosaico NIR visualizado en Pix4D discovery .....	76
Figura 41, Estadísticos del procesamiento de los mosaicos de reflectancia .....	77
Figura 42, Control de calidad, extraído del reporte de calidad del procesamiento ....	77
Figura 43, Modelo de NDVI (1) .....	78
Figura 44, Zonificación en QGIS.....	80
Figura 45, Ejemplo de datos crudos de un punto.....	82
Figura 46, Archivos .asd en ViewSpec Pro.....	83
Figura 47, Curva espectral del punto E1_21 .....	83
Figura 48, Exportado de datos crudos en .txt.....	84
Figura 49, Datos exportados en .txt .....	84
Figura 50, Histograma de errores entre sensores .....	87
Figura 51, Histograma de NDVI.....	88
Figura 52, Diagrama de Caja .....	89
Figura 53, Gráfico de Dispersión Este-NDVI.....	89
Figura 54, Gráfico de Dispersión Norte-NDVI.....	90
Figura 55, Variograma Experimental.....	91
Figura 56, Nube variográfica .....	92
Figura 57, Modelamiento del variograma experimental .....	93
Figura 58, Error de validación cruzada .....	94
Figura 59, Modelo NDVI en R .....	95
Figura 60, Modelo de Predicción de NDVI, Modelo NDVI (2) .....	96



Figura 61, Error de estimación del modelo de predicción .....	97
Figura 62, Modelo de diferencias, NDVI (1) - NDVI (2).....	99

## RESUMEN

Con la modernización de las prácticas agrícolas surgen nuevos desafíos, especialmente en sustentabilidad ambiental y económica del proceso de producción. La rentabilidad de una explotación ganadera depende de la calidad del alimento, que si no es manejado de una manera técnica puede afectar a la rentabilidad de la producción. El crecimiento demográfico en el Ecuador, exige que cada año se destinen mayores áreas a la producción de alimentos. Es por eso que, para prevenir estos cambios en el uso de suelo, se busca implementar nuevas tecnologías para optimizar. El objetivo fue analizar el comportamiento del NDVI a través del contraste de un modelo geoestadístico construido desde datos del espectrorradiómetro terrestre FieldSpec4 y una imagen aérea con información multiespectral del sensor Parrot Sequoia, todo esto en cultivos de pasto en etapa previa al pastoreo. Para llevar a cabo esto se implementaron cuatro fases metodológicas. En la primera se calculó el modelo NDVI mediante UAV, seguidamente se compararon y validaron los sensores espectrales, posteriormente se calculó un modelo geoestadístico de NDVI y finalmente se analizó la correlación entre ambos modelos. Tras el análisis de ambos modelos de NDVI se obtuvo errores medios cuadráticos bajos, una correlación de 76,89% y un valor de  $R^2 = 0.5912$  el cual se define como una bondad de ajuste positiva. La principal conclusión de este estudio es que el modelo de NDVI obtenido con el sensor Parrot Sequoia es el que ofrece mayor rentabilidad, además de que su uso en UAV ha reducido considerablemente los costos.

## PALABRAS CLAVE

- **NDVI (ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA)**
- **UAV (VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO)**
- **SENSOR MULTIESPECTRAL**
- **ESPECTRORRADIÓMETRO TERRESTRE**
- **GEOESTADÍSTICA**

## **ABSTRACT**

With the modernization of agricultural practices, new challenges arise, mainly regarding the environmental and economic sustainability of the production process. The profitability of a livestock farm depends mainly on the quality of the food supplied to the animals, which if not managed in a technical way can affect the profitability of products. Demographic growth in Ecuador requires larger areas to produce food every year, in order to prevent these changes in land use, that is why raise the need to implement new technologies to optimize food production. The objective of this research was to analyze the variation of NDVI between a geostatistical model generated from data obtained with a terrestrial spectroradiometer and a multispectral image obtained by UAV, in pasture cultures in pre – grazing stage. To carry out this, four methodological phases were implemented. The first one, the NDVI model was calculated by UAV, then the spectral sensors were compared and validated, then a geostatistical model of NDVI was calculated and finally the correlation between the two models was analyzed. After the analysis of both models of NDVI, low squared mean errors and a positive correlation with a value of 76.89% were obtained in addition to a value of  $R^2 = 0.5912$  which is defined as a positive adjustment goodness. The main conclusion of this study is that the NDVI model obtained with the Parrot Sequoia sensor is the one that offers greater profitability; in addition to that, its use in unmanned aerial platforms UAV has reduced considerably the costs.

### **KEY WORDS**

- **NDVI**
- **UAV**
- **MULTIESPECTRAL SENSOR**
- **GEOSTATISTICS**

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Con la modernización de las prácticas agrícolas, surgen nuevos desafíos, principalmente respecto al concepto de sustentabilidad ambiental y económica del proceso de producción. Para ello se aplican un conjunto de técnicas, que reciben el nombre de agricultura de precisión y que consiste en aplicar la cantidad correcta de insumos en el momento adecuado y en el lugar exacto. Dicha tecnología ayuda a conocer la variabilidad presente dentro de un lote de cultivo mediante una combinación de técnicas geoespaciales que permiten representar cada una de estas variables. La agricultura de precisión ocupa los Sistemas de Posicionamiento Global por Satélites o por sus siglas en inglés *GNSS*. (Garcia & Flego, N.D.).

Por su parte, las plataformas aéreas no tripuladas son empleadas en numerosas aplicaciones como: entretenimiento, seguridad, comunicación, comercio y proyectos de ingeniería en general. Dichas plataformas son una opción viable para la agricultura de precisión. Los *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) al ser dispositivos controlados por un mando remoto, permiten obtener información de lugares inaccesibles. En la actualidad los UAV poseen sensores que permiten recolectar fotografías y videos de alta definición con los que se puede obtener información multiespectral de la superficie de la Tierra.

Hoy en día, la Geoestadística es un nombre asociado con una clase de técnicas, que permiten analizar y predecir los valores de una variable que está distribuida en el espacio o en el tiempo. Se asumen tales valores implícitamente, para ser puestos en correlación entre sí, y el estudio de semejante correlación normalmente recibe el nombre de "análisis estructural" o "Variograma". Después del análisis estructural, se

hacen estimaciones a las situaciones de los sectores no muestreados usando la técnica de interpolación "Kriging". La Geoestadística, tiene como objetivo el caracterizar, interpretar y predecir el comportamiento de los datos que están distribuidos espacialmente "variables regionalizadas". (Viera & Gonzales, 2002)

## **1.2 Definición del problema**

En la actualidad el manejo agronómico que se da a las pasturas en el Ecuador se encuentra retrasado más de treinta años con respecto a países considerados de primer mundo, donde existe un gran desarrollo y se lleva a cabo la implementación de nuevas tecnologías, como es el caso de la agricultura de precisión. Esta tendencia inició en 1980 en Estados Unidos y se define como un conjunto de técnicas para realizar el levantamiento de información utilizando sensores y plataformas equipos que agilitan y amplían la colecta de datos del campo agrícola, para analizar y crear soluciones en cuanto a optimización de medios de producción.

La rentabilidad de una explotación ganadera depende de muchos factores, uno de los principales es la calidad en el alimento suministrado a los animales, que si no es manejado de una manera técnica puede afectar a la rentabilidad de productos que genera el país, especialmente los que tienen un fuerte impacto económico debido a la exportación de estos productos o a la producción masiva para satisfacer las necesidades nacionales. El problema en las pasturas andinas es su complejidad, ya que dependen de la altitud y del clima del sitio. Por otra parte, estas pasturas suelen ser naturales, lo que quiere decir que nunca se sembró una mezcla forrajera, y se expanden sin planificación.

Históricamente el Ecuador ha tardado varios años en implementar nuevas tecnologías, debido a diversos factores principalmente económicos. Sin embargo, estos últimos años se ha implementado en varios campos los UAV debido a la facilidad económica de adquirir uno. Esto ha permitido que se busquen mayores aplicaciones para estos instrumentos y ayuden en la producción nacional, como es el caso de este

estudio, en el que se utilizó un sensor multispectral desarrollado específicamente para trabajar en drones.

El presente estudio realizó la colecta de datos espectrales en base a dos métodos de captura, donde el objetivo de la investigación fue contrastar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) aplicando la metodología de toma de datos para UAV, y esta misma variable obtenida con un espectrorradiómetro terrestre, con lo cual se puede determinar si los datos obtenidos alcanzan el nivel de calidad requerido y pueden ser interesantes en la toma de decisiones.

### **1.3 Justificación**

El crecimiento demográfico en el Ecuador, exige que cada año se destinen mayores áreas de terrenos que produzcan alimentos para esta población es por eso que, para prevenir estos cambios en el uso de suelo, se busca implementar nuevas tecnologías para optimizar la producción de alimentos, es decir que en las mismas 5,67 millones de hectáreas utilizadas para labor pecuaria en el 2015 (INEC, 2015) mediante una optimización de tratamientos y abonos, lograr aumentar el rendimiento en ese mismo espacio limitado. Es ahí cuando la agricultura tradicional busca el apoyo tecnológico desarrollando la agricultura de precisión como se la conoce en estos días. Estas técnicas ayudan en la productividad de los procesos agronómicos, y por lo tanto en su rentabilidad.

Con el auge en los últimos años de los UAV, se ha aprovechado esta tecnología para brindar un servicio conocido como “Agricultura de Precisión”, que es un conjunto de técnicas para levantamiento de información, que busca optimizar los medios de producción de alimentos. Este conjunto de técnicas ha sido utilizado en distintas plantaciones a lo largo del territorio ecuatoriano; en este caso se plantea aplicar al crecimiento de pastizales que se utilizan para la crianza de ganado vacuno, el cual posteriormente se destina a la producción de leche y productos lácteos. Esta técnica nace en la década de los 80 en Estados Unidos. (Bongiovanni, R et al, 2006)

Ante esta premisa, se buscará que las 45.955, 26 hectáreas dedicadas a pastizales en los cantones Rumiñahui y Mejía según datos del MAGAP (2014), se beneficien de esta metodología de trabajo aplicada y de este modo se pueda tomar decisiones sobre las parcelas dedicadas a esta actividad para así optimizar sus recursos y generar una mayor producción para su ganado.

## 1.4 Área de Estudio

### 1.4.1 Área de Influencia

El presente estudio está enfocado a todos los predios con pastizales principalmente de la especie *Pennisetum clandestinum*, que cuenten con un manejo agronómico y se ubiquen en los cantones Mejía y Rumiñahui (Figura 1), a pesar de esto la apuesta tecnológica y metodológica puede ser aplicada en todo el sector agrícola para optimizar los medios de producción de sus cultivos.

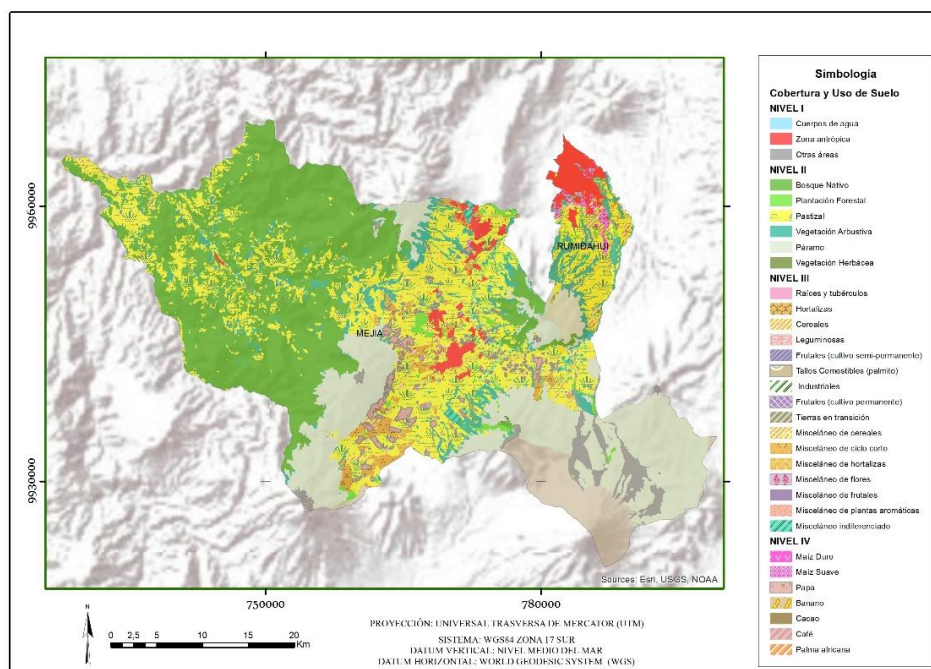


Figura 1, Mapa de uso y cobertura de suelo de los cantones Rumiñahui y Mejía

Fuente: Modificado (MAGAP, 2014)

### 1.4.2 Localización Geográfica

El ensayo se estableció en el IASA I en la Hacienda El Prado, Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, ubicada en el cantón Rumiñahui al sureste de la provincia de Pichincha, donde se utilizó un lote de potrero con un área de 1,16 hectáreas, que se encontraba con pastura natural previa pastoreo. (Figura 2).

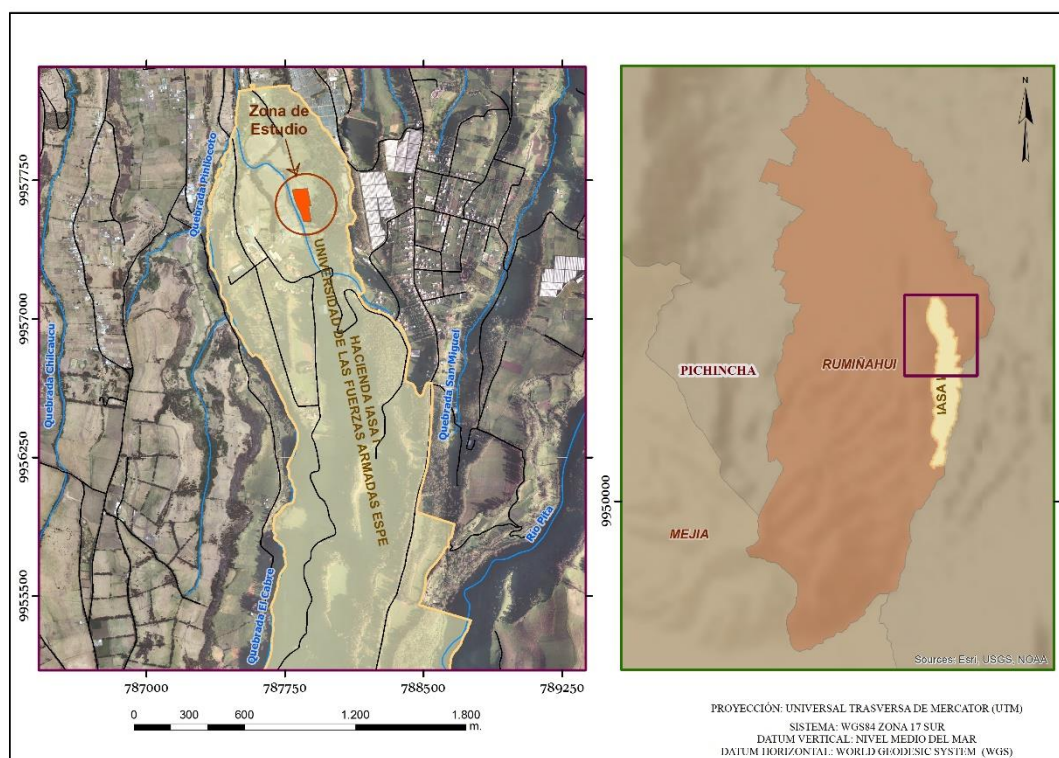


Figura 2, Mapa de Ubicación

Fuente: Elaboración Propia

### 1.4.3 Descripción del Área de Estudio

El área de estudio seleccionada corresponde a una zona de la Hacienda IASA I, destinada a pasturas del hato lechero, vaconas vientre y vacas preñadas. El manejo de parámetros productivos y reproductivos para la zona es relativamente nuevo haciendo que no se pueda establecer el nivel de degradación de la pastura natural.

De los estudios de Holdridge (1982) y Sierra et al (1999) citados por (Arce Carriel, 2009) se puede determinar que la hacienda el Prado corresponde a un piso altitudinal montano bajo, región latitudinal templada, zona de vida bosque húmedo,



provincia de humedad: húmeda, clasificación bioclimática húmedo – temperado, formación vegetal bosque húmedo montano y a un piso zoogeográfico temperado – alto andino

## **1.5 Objetivos**

### *1.5.1 Objetivo General*

- Analizar la variación de NDVI entre un modelo geoestadístico generado a partir de datos obtenidos con un espectrorradiómetro terrestre y una imagen multiespectral obtenida mediante UAV, en cultivos de pastos en etapa previa al pastoreo.

### *1.5.2 Objetivos Específicos*

- Validar el sensor multiespectral Parrot Sequoia por medio del espectrorradiómetro FieldSpec4, en condiciones controladas de laboratorio y en campo.
- Obtener información multiespectral de la zona de estudio, mediante el sensor multiespectral Parrot Sequoia montado en un UAV DJI Matrice 100.
- Generar el modelo de NDVI con la información multiespectral obtenida con el UAV.
- Diseñar un plan de muestreo, mediante criterio experto, para la obtención de un modelo óptimo de información.
- Obtener información multiespectral de la zona de estudio, mediante un espectrorradiómetro FieldSpec4 utilizando el plan de muestreo.

- Calcular el NDVI en cada punto de muestreo a partir de los valores de reflectancia del espectrorradiómetro FieldSpec4.
- Generar un modelo geoestadístico de predicción de NDVI en la parcela.
- Detectar una variación significativa de los valores del NDVI, comparando los productos conseguidos con las dos técnicas multiespectrales utilizadas.

### **1.6 Metas del Proyecto**

- Un reporte de validación del sensor multiespectral Parrot Sequoia, obtenido en el laboratorio del área de investigaciones espaciales del Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE).
- Un plan de muestro geoestadístico de la zona de estudio.
- Un reporte de las coordenadas de los puntos obtenidos del plan de muestreo.
- Un reporte de los datos de reflectancia de cada punto de muestreo.
- Una base de datos de los valores de NDVI de cada punto de muestreo.
- Un modelo de predicción de NDVI a partir de la información generada por el espectrorradiómetro.
- Un ortomosaico de información multiespectral obtenida mediante un UAV.
- Un modelo de NDVI a partir de la información generada por el sensor multiespectral Parrot Sequoia.

- Un modelo comparativo entre los valores de NDVI generados por cada una de las técnicas.
- Una tabla de comparación de los resultados obtenidos por ambos métodos.

## CAPÍTULO II

### 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1 Análisis Espectral

El objetivo del análisis espectral es capturar la distribución espectral de la energía, es decir obtener el flujo de energía reflejado sobre una superficie u objeto respecto a una longitud de onda (Zamorano, 2015). La espectroscopia como ciencia se encarga de estudiar la emisión y absorción de la radiación electromagnética por la materia. La energía captada de la radiación tiene carácter ondulatorio, esta está determinada por su frecuencia o longitud de onda, que a su vez es conocida como espectro electromagnético (ver Figura 3), el cual se clasifica en:

- Rayos cósmicos
- Rayos gamma
- Rayos X
- Radiación ultravioleta-visible
- Radiación infrarroja
- Microondas

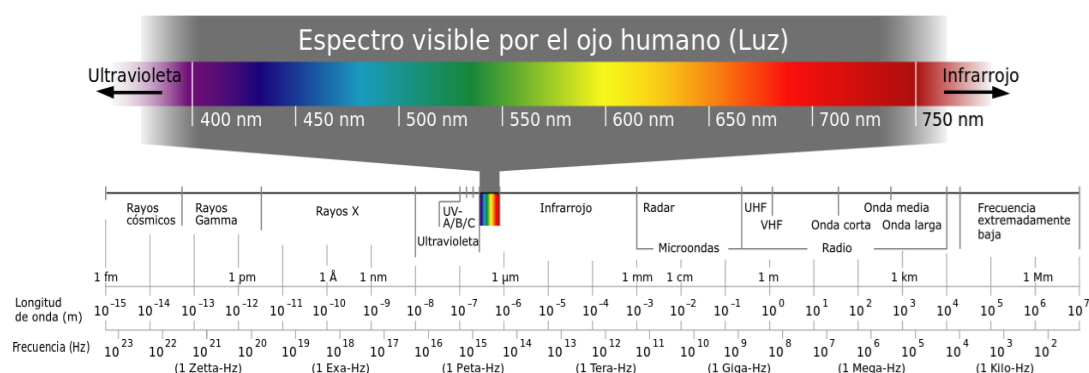


Figura 3, Clasificación del espectro electromagnético

### 2.1.1 *Sensores Espectrales*

Para la recolección de datos espectrales existe una amplia gama de sensores que se encargan de detectar la energía reflejada sobre un material. Para cada región del espectro electromagnético se van desarrollando día a día nuevos equipos que dependiendo de la rama de estudio a ser aplicada modifica a conveniencia cada uno de los tres componentes básicos: foco energético, superficie y sensor (Universidad de Girona, 2016)

### 2.1.2 *Clasificación de sensores espectrales*

Los sensores espectrales se clasifican de acuerdo a cada componente básico, de esta forma si se toma en cuenta el procedimiento de recibir energía o foco energético se clasifican en:

- **Sensores Activos:** Este tipo de sensores incorporan un emisor de energía, que luego será reflejada sobre el material y captada nuevamente por el sensor registrando los valores de energía. Ejemplos de este tipo de sensores son: radar, lidar entre otros.
- **Sensores Pasivos:** Este tipo de sensores son los que captan y registran la radiancia reflejada por la superficie terrestre, siendo el sol el principal foco energético. Ejemplos de estos son: sensores fotográficos, sensores de barrido entre otros.

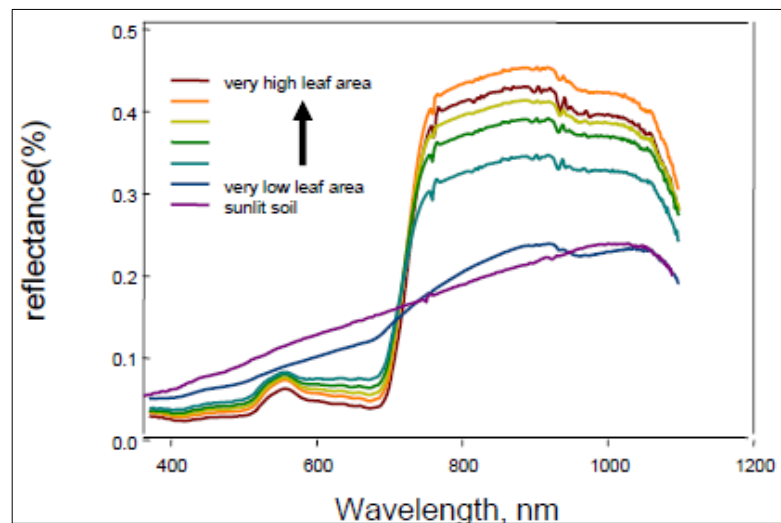
Estos sensores pasivos a su vez tienen una clasificación de acuerdo al producto que se obtiene de su recolección de datos.

- No escáneres.
  - No formadores de imagen.
    - gravímetros.
    - espectrómetros de Fourier.
    - radiómetros de microondas.
    - sensores magnéticos.
    - otros.
  - Formadores de imagen

- cámaras.
  - infrarrojo.
  - infrarrojo color.
  - monocromas.
  - color natural
  - otras.
- Escáneres
  - Formadores de imagen
    - escáner del plano imagen.
      - escáneres sólidos.
      - cámaras de TV.
    - escáneres del plano objeto.
      - radiómetros de microondas.
      - escáneres óptico-mecánicos.

### 2.1.3 *Firma Espectral*

Al alcanzar la superficie terrestre, la energía electromagnética, reacciona de diferente manera con cada material, produciendo diferentes fenómenos conocidos como absorción, reflexión o transmisión, que se ven reflejados en el patrón de respuesta espectral, particularizando cada caso. En la clasificación de imágenes se aprovecha este patrón para poder detectar el comportamiento distintivo de cada material, además de denominar como “Firma Espectral” a la gráfica de la reflectancia en el eje Y, y a la longitud de onda en el eje X (Figura 4). Para detectar estas respuestas espectrales, se utilizan diferentes equipos óptico-electrónicos que son capaces de captar esta información en diferentes rangos del espectro electromagnético. (Hernandez Palma, 2011)

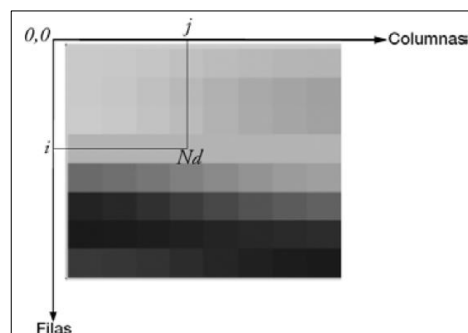


*Figura 4, Firma espectral, respecto al área foliar.*

*Fuente: (Karszenbaum & Barraza, 2016)*

#### 2.1.4 Imagen Digital

En los inicios de la era espacial cuando el ser humano se interesó en la observación de la Tierra, se promovió la colocación de satélites en órbita. Desde ese momento se vio la necesidad de reemplazar las fotografías convencionales por imágenes de carácter digital. Esta imagen es un arreglo bidimensional conformado por filas y columnas ( $i,j$ ) como se indica en la (Figura 5), que relacionan una posición geométrica que pueden ser coordenadas. Cada celda de este arreglo matricial recibe el nombre de pixel.



*Figura 5, Coordenadas de la Imagen Digital.*

*Fuente: (Quirós Rosado, 2014)*

Según lo que describe Pérez (2001), a cada pixel le recae un valor digital que en el ámbito de la teledetección y la fotogrametría se lo conoce como un nivel digital (ND). Este se asocia al nivel de intensidad reflejada por el espacio original que capta el sensor. De esta forma se compone una imagen digital que en el caso de considerar un solo arreglo matricial  $(i,j,ND)$  (ver Tabla 1), se visualiza cada pixel en escala de grises, es decir tiene una sola banda (Figura 6) (Jauregui, 2005)

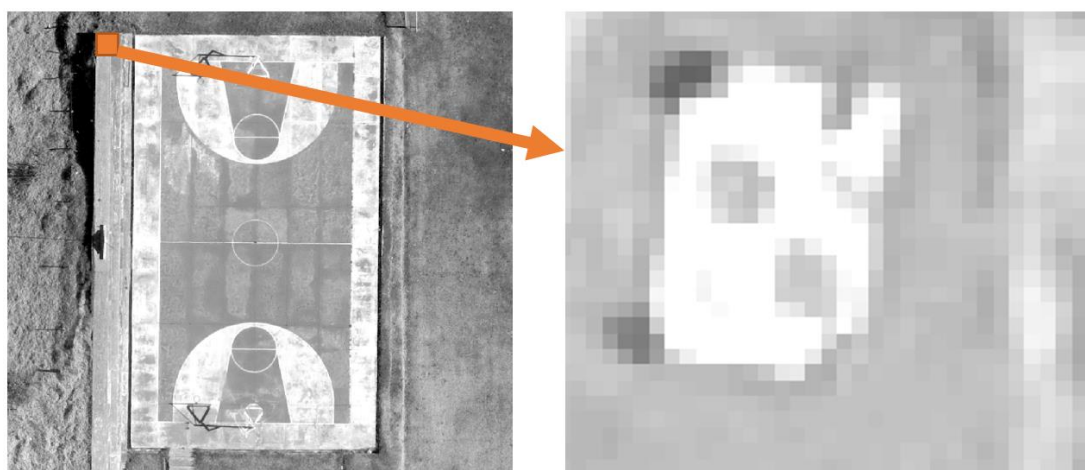


Figura 6, Imagen digital monobanda de cancha de básquet en el IASA, y ampliación de pixeles.

Fuente: Elaboración propia

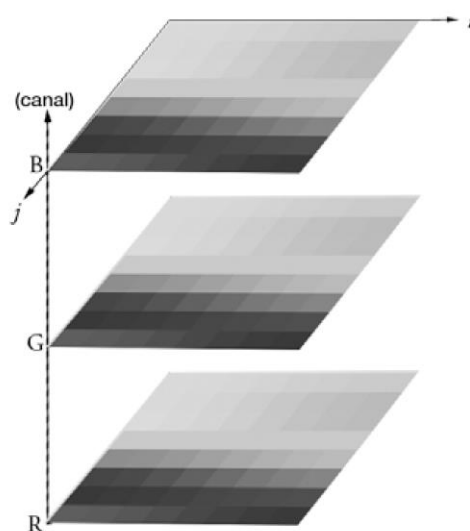
Tabla 1

Valores digitales de una imagen de 8 bits

Í <sub>7</sub>	190	127	98	160	131	2	112	95	5	221
Í <sub>6</sub>	191	7	232	144	147	38	194	39	48	4
Í <sub>5</sub>	30	85	193	29	87	197	150	45	242	23
Í <sub>4</sub>	16	179	9	14	38	19	145	251	30	255
Í <sub>3</sub>	117	133	100	237	163	84	252	153	251	94
Í <sub>2</sub>	204	175	230	19	25	220	40	188	87	7
Í <sub>1</sub>	30	67	218	130	209	212	204	7	46	213
	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>5</sub>	J <sub>6</sub>	J <sub>7</sub>	J <sub>8</sub>	J <sub>9</sub>	J <sub>10</sub>



Esta estructura de la imagen digital es la que pertenece a una imagen monobanda, o lo que representa la composición de una sola matriz, y que se concebiría como niveles de gris. Sin embargo las imágenes (RGB) a color, como se aprecia en la (Figura 7), está dispuesta por tres matrices, una para el color rojo (Red), otra para el color verde (Green) y otra para el color azul (Blue). (Quirós Rosado, 2014)



*Figura 7, Imagen Digital RGB.*

*Fuente: (Quirós Rosado, 2014)*

## 2.2 Índices de Vegetación

Los índices de vegetación están basados en los valores digitales de una imagen y representan medidas cuantitativas que se pueden utilizar para medir la biomasa o el vigor vegetal. Un índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de una operación aritmética entre dichas bandas, para generar un valor que permita estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación en un píxel. Valores altos indican vegetación saludable.

Existen varios índices de vegetación que ayudan a monitorear características específicas de distintas especies. La mayoría de estos índices se basan en la interacción

entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo. (Diáz, 2015)

### 2.2.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI

El objetivo de este índice es separar la vegetación del brillo que produce el suelo. Se basa en el comportamiento radiométrico de la actividad fotosintética y la estructura foliar de la vegetación. Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por la vegetación en el espectro electromagnético. En la vegetación sana, se puede ver claramente un contraste entre la banda roja, y el Infrarrojo Cercano *NIR*. En el espectro visible se absorbe la mayor parte de la energía de los pigmentos de la hoja; en el *NIR*, refleja la mayor cantidad de energía de las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua. Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, la cantidad de agua disminuye, disminuye el *NIR* y aumenta paralelamente el rojo, ya que tiene menor absorción clorofílica.

El cálculo del NDVI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el infrarrojo Cercano *NIR* y el rojo *RED*.

$$NDVI = \frac{\varphi_{NIR} - \varphi_{RED}}{\varphi_{NIR} + \varphi_{RED}} \quad E. 1$$

Donde:

- *NIR* es la reflectancia espectral del canal infrarrojo cercano
- *RED* representa la reflectancia en el canal rojo del visible.

Los valores de este índice se encuentran entre -1 y 1. Los valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor de este índice, las condiciones de vigor son mejores. (Diáz, 2015)

## 2.3 Fotogrametría

La palabra fotogrametría según su significado etimológico significa la métrica de lo escrito con luz. En Quirós (2014) se define a la fotogrametría como la ciencia que utiliza la fotografía para hacer medidas, que sería su interpretación de la etimología pero a su vez añade que su aplicación se puede extender a numerosas áreas de conocimiento.

Si se recurre a una definición clásica de fotogrametría Bonneval (1972) dice que es una técnica que su objetivo es estudiar y definir con precisión las dimensiones, forma y posición en el espacio de un cuerpo cualquiera utilizando fundamentalmente medidas hechas sobre una o varias fotografías. Lo cual si se llega a comparar con la definición más actual no se evidencia un cambio en la finalidad de esta ciencia. Lo que sí ha ido cambiando a lo largo de los años son los sistemas o equipos utilizados para generar la información.

### *2.3.1 Fotogrametría Aérea*

Es un tipo de fotogrametría que nace con los estudios realizados por el francés Gaspard Félix Tournachon cuando desde un globo aerostático, en 1858 logró capturar el Bois de Bolougne en la primera fotografía aérea tomada desde una altura de 300 metros. (Zurita, 2015). Se denomina de este modo por la ubicación del sensor para la captura de la imagen sobre una plataforma aérea; la ventaja de esta esta es que se puede recubrir grandes áreas de terreno en un tiempo relativamente bajo y sus productos pueden ser de tipo 2D y 3D.

### *2.3.2 Fotogrametría Digital*

El desarrollo de la fotogrametría digital se da con la aparición de equipos informáticos que permiten escanear fotografías sin perder resolución. El despegue de esta se produce con la aparición de sensores que permiten la captura de imágenes digitales, para lo cual ha sido necesario el avance tecnológico tanto en el ámbito del hardware como del software. Esta combinación permite a los usuarios cada día obtener mejores productos y en menor tiempo. (Hernández, 2006)

Actualmente, un equipo de fotogrametría digital es denominado estación fotogramétrica. Esta integra un conjunto de hardware y software que permite realizar todo el procesamiento fotogramétrico. Cada año se puede visualizar un gran cambio en este conjunto ya que las aplicaciones existentes demandan mayor capacidad de procesamiento y almacenamiento por los productos que se ofrecen. Sin embargo, los fabricantes de los equipos no se quedan atrás y ahora se puede realizar todo el procesamiento en una PC portátil.

### 2.3.3 Aplicaciones de la fotogrametría

La fotogrametría cada día encuentra más aplicaciones, esto debido al desarrollo de plataformas aéreas no tripuladas, pues la relación costo-beneficio, ha permitido que campos distintos al ámbito geográfico puedan utilizar este conjunto de técnicas y acoplarlas de la mejor manera a otros campos científicos. A continuación, se detallan varias aplicaciones que hasta el día de hoy se han dado a conocer y siguen en crecimiento:

- Fotogrametría clásica (cartografía)
- Agricultura de precisión
- Reconstrucción arqueológica
- Revisión de infraestructura del patrimonio cultural
- Otros

## 2.4 Sistema Aéreo No Tripulado

La revista Perfiles IDS en su edición de febrero (2014) define los sistemas aéreos no tripulados de la siguiente manera:

*“Podemos definir un sistema aéreo no tripulado (UAS) como aquel sistema compuesto por uno o más vehículos aéreos no tripulados (UAV) y todos aquellos elementos necesarios para su operación (sistemas de control, comunicaciones, medios de lanzamiento y recuperación, elementos de*

transporte, etc.) y equipos de apoyo asociados. Genéricamente los UAS están compuestos por un segmento aéreo y un segmento terreno. (pág. 12)”

#### 2.4.1 Vehículos Aéreos No Tripulados

Se entiende por vehículo aéreo no tripulado (VANT), también conocido como UAV, por su definición en inglés de *Unmanned Aerial Vehicle*, a una aeronave capaz de realizar una misión sin necesidad de tener una tripulación a bordo, entendiéndose que no necesariamente se excluye la existencia de un piloto u operador de misión que realice el monitoreo desde tierra. (Barrientos et al., 2007)

#### 2.4.2 DJI Matrice 100 Cuadricopter

El cuadricóptero “DJI Matrice 100 (M100)” es un drone multirotor diseñado por una de las empresas pioneras del mercado DJI. Este modelo ha sido desarrollado para testar nuevos desarrollos incluyendo hardware y software, lo que permite fácilmente montar otros sensores (ver Figura 8).

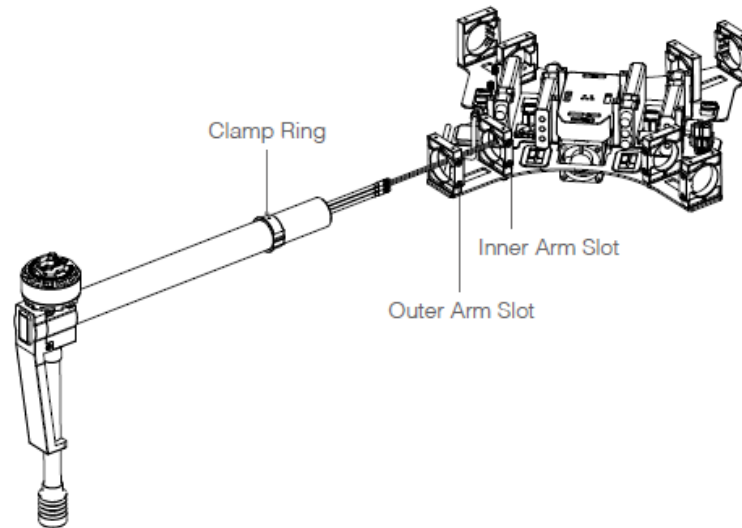


Figura 8, DJI Matrice 100

Fuente: (DJI, 2017)

Este equipo integra un cuerpo (*Center Frame*) con cuatro brazos que integran los motores y estos a su vez las hélices como lo muestra la (Figura 9). El M100 puede

permanecer estático, y alcanzar velocidades crucero apropiadas para fotografía aérea y otras aplicaciones de aeromodelismo.



*Figura 9, Componentes del M100*

*Fuente: Manual de usuario DJI Matrice 100*

La empresa DJI (2017) en su sitio web detalla que las características principales con las que cuenta el sistema “DJI Matrice 100” son:

- Un sistema de ala rotatoria, con despegue vertical.
- El equipo está diseñado para una resistencia al viento de máximo 10 m/s.
- Tiene un peso de 2431 g con una batería.
- Un peso máximo de despegue de 3600 g.
- Una temperatura de operación ente -10°C to 40°C
- La cámara tiene un sistema de estabilización (Gimbal), que junto con el sensor Zenmuse X3 (RGB) incorporado y 3 motores, centran y compensan automáticamente las imágenes capturadas (ver Figura 10).



*Figura 10, Sensor Zenmuse X3 con Gimbal*

*Fuente: (DJI, 2017)*

- Cada motor del Gimbal del sensor, son de tipo Brushless; es decir, no tienen engranajes, ni límite que frene el giro de la cámara.
- Cuenta con sistema de radio control C1, con dos mandos a pilotar, izquierda controla la aceleración y cola mientras que la derecha el movimiento de izquierda a derecha, adelante y atrás.
- El equipo tiene compartimiento para dos baterías.
- La distancia máxima de transmisión probada del radio es de 3,5 km.
- La velocidad máxima horizontal que puede alcanzar es 22 m/s, en modo ATTI y 17 m/s en modo GPS.
- Cuenta con un sistema de autopiloto N1, que permite conectarse a aplicaciones para Smartphone o Tablet que realizan toda la planificación de vuelo, esta se conecta al control remoto para realizar el vuelo (ver Figura 11).



*Figura 11, Radio Control DJI Matrice 100*

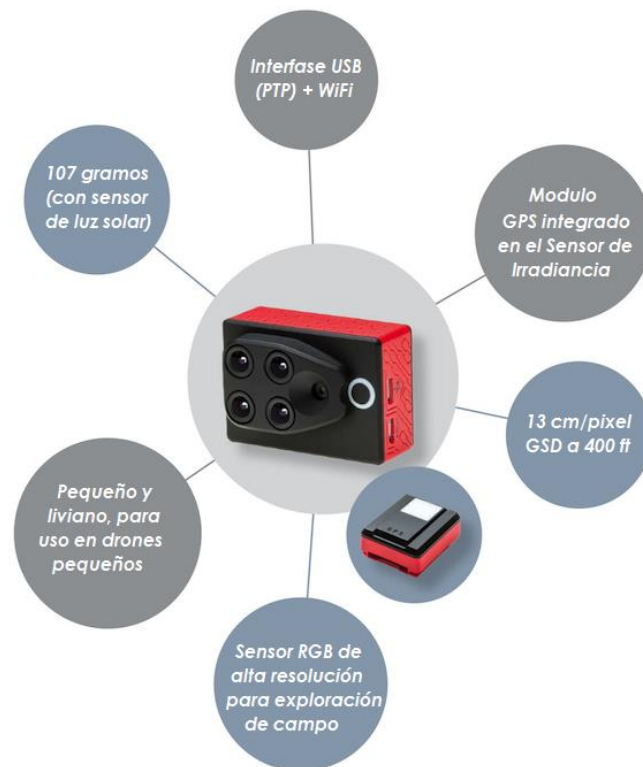
*Fuente: (DJI, 2017)*

### *2.4.3 Sensor Multiespectral Parrot Sequoia*

El sensor multiespectral Sequoia es un sensor desarrollado por la empresa Parrot. Esta empresa ha enfocado este producto al análisis de la vitalidad de las plantas mediante la detección por parte del sensor de la cantidad de luz que estas absorben y reflejan, todo gracias a sus dos sensores, uno multiespectral y otro de luz solar. Estos datos permiten al experto aplicar a costos bajos la agricultura de precisión.

El dispositivo Parrot Sequoia se compone de dos sensores. El sensor "multiespectral", ubicado de frente a la vegetación, para captar la luz que esta refleja en cuatro segmentos diferentes del espectro electromagnético: el verde, el rojo, así como dos bandas infrarrojas que no pueden ser visibles para el ojo humano, la *rededge* y un infrarrojo cercano *NIR*. El sensor "*sunshine*", ubicado en la parte superior del drone, capta la intensidad de la luz que irradia el sol en estas mismas cuatro bandas de luz (Figura 12).





*Figura 12, Sensor multispectral y sensor de luz solar Parrot Sequoia*

*Fuente: Traducido del inglés de (Parrot, 2017)*

Las especificaciones técnicas del sensor se detallan en la (Tabla 2), estas características definen al sensor y son utilizadas para elaborar todo el proceso fotogramétrico.

Tabla 2

*Especificaciones técnicas del sensor Parrot Sequoia*

<b>Cámara RGB 16 Mpix Rolling Shutter</b>	<b>FPS</b>
Definición: 4608x3456 píxeles	1 FPS con 4 bandas + cámara RGB
HFOV: 63.9	Hasta 2 FPS con 4 bandas únicamente
VFOV: 50.1	Autocalibrado gracias a un sensor de insolación
DFOV: 73.5	Configuración con Wi-Fi (aplicación iOS/Android)
<b>4 cámaras monobanda 1.2 Mpix Global shutter</b>	Comunicación USB para dron u ordenador(open sdk)
Definición: 1280x960 píxeles	GPS
HFOV: 70.6	IMU + magnetómetro
VFOV: 52.6	eMMC 64GB
DFOV: 89.6	Ranura tarjeta SD
<b>Peso y dimensiones</b>	<b>Ancho de banda espectral</b>
<b>Sensor multiespectral :</b>	Verde (530-570) nm
59 x 41 x 28	Rojo (640-680) nm
Peso: 72g / 2.5 oz	Red Edge (730 - 740) nm
<b>Sensor luz solar :</b>	Infrarrojo cercano (770-810) nm
47 x 39,6 x 18,5	
Peso: 36g / 1.3 oz	

Fuente: Adaptado de (Parrot, 2017)

#### 2.4.4 Puntos de control terrestre

Los puntos de control terrestre son parte fundamental dentro del proceso fotogramétrico. Estos permiten que el software fotogramétrico, genere un proceso de orto rectificación con coordenadas de alta precisión. Para la obtención de estos puntos de control terrestre se utiliza tecnología satelital de posicionamiento con equipos GNSS (Global Navigation Satelital System), que alcanzan precisiones centimétricas. Existen numerosos métodos de posicionamiento, aunque los más utilizados para procesos fotogramétricos son:

- Fast Static – Estático Rápido
- RTK Real Time Kinematic – Cinemático en Tiempo Real

#### 2.4.5 Plan de Vuelo

Los sistemas de DJI se encuentran bajo licencias de código libre, y con la facilidad de la integración con sistemas iOS o Android, mediante aplicaciones gratuitas o pagadas. Con estos sistemas, que se conectan mediante USB a la radio controladora del Matrice 100, se envían los comandos de vuelo al dron mediante telemetría. Las

aplicaciones permiten generar el plan de vuelo mediante la configuración de algunos parámetros como altura de vuelo y traslapo de imágenes, que varían en función del sensor seleccionado y que aparecen pre programados en dichas aplicaciones.

## 2.4.6 Software de Procesamiento

### 2.4.6.1 Trimble Business Center

La descripción técnica de TRIMBLE (2015) respecto a su software TBC ver (Figura 13), expone que es una aplicación para escritorio, que permite procesar y ajustar, una combinación de datos de topografía, GNSS, ópticos, datos de barrido e incluso observaciones aéreas. Esta aplicación permite procesar líneas base GNSS, ajuste de imágenes aéreas utilizando técnicas fotogramétricas, puntos de control terrestre, medición de puntos y creación automática de productos 3D.

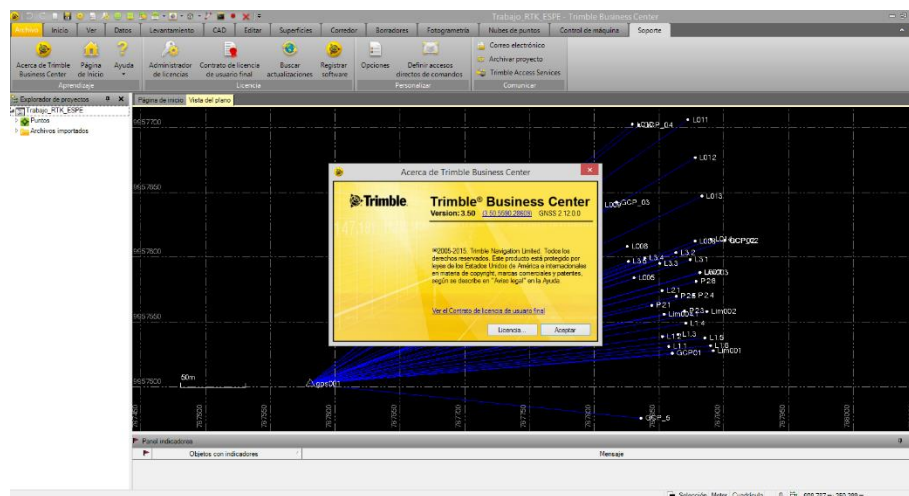


Figura 13, Interfaz Trimble Business Center 3.50

### 2.4.6.2 Pix4D

Pix4D es un software fotogramétrico que utiliza imágenes para generar nubes de puntos, superficies digitales y modelos del terreno, ortomosaicos, modelos de texturas etc. Pix4D convierte automáticamente imágenes aéreas RGB en mapas georreferenciados 2D y modelos 3D, alcanzando altas precisiones y también trabaja

con imágenes multiespectrales que convierte en mapas de reflectancia, y calcula índices como el NDVI, este software también ha incluido procesamiento de imágenes provenientes de sensores termales. (Pix4D, 2017)

## 2.5 Espectrometría

### 2.5.1 Espectrorradiómetro FieldSpec 4

El FieldSpec 4 Hi-Res es un espectrorradiómetro de alta resolución diseñado para mediciones rápidas y precisas de datos espectrales aprovechables en una amplia gama de aplicaciones de teledetección. La resolución espectral de 1 nm FR, del espectrorradiómetro FieldSpec 4 Hi-Res ver (Figura 14) proporciona un rendimiento espectral superior en todo el espectro de irradiancia solar. La resolución espectral mejorada en el rango de (350 - 2500 nm) es particularmente útil para detectar e identificar compuestos con características espectrales estrechas en las longitudes de onda más largas, tales como mineralogía de alteración y gases para el análisis atmosférico. (ASD Inc., 2017)



*Figura 14, Espectrorradiómetro FieldSpec4 Hi-Res*

*Fuente: (ASD Inc., 2017)*

Además, la resolución de 8 nm., satisface o supera la resolución espectral de la mayoría de los sensores hiperespectrales, lo que lo convierte en una excelente opción para la validación y calibración de sensores, la comprobación del terreno y la construcción de bibliotecas espectrales.

### *2.5.2 Software de Procesamiento*

#### *2.5.2.1 RS<sup>3</sup>*

Es la tercera versión del software proporcionado por ADSL Inc., que provee a los clientes de equipo FieldSpec 4 las siguientes utilidades: (ADS Inc., 2008)

- Controlar el funcionamiento de un espectrorradiómetro de uso general ASD
- Recibir y almacenar los datos espectrales transmitidos desde un espectrorradiómetro ASD.

#### *2.5.2.2 ViewSpecPro*

La aplicación ViewSpecPro es un programa de escritorio utilizado para procesar archivos espectrales que se guardan utilizando algún instrumento ASD Inc.. Los datos brutos colectados en campo se pueden procesar en datos de radiancia o reflectancia con esta herramienta de post-procesamiento. Así mismo este aplicativo permite visualizar la curva espectral generada. Finalmente permite y exportar los datos capturada en archivos genéricos para su posterior utilización. (ASD Inc., 2002).

## **2.6 Agricultura de Precisión AP**

La agricultura de precisión es el conjunto de disciplinas, que con la utilización y aplicación de nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) ayudan en la recolección e interpretación de datos útiles con la finalidad de tomar decisiones asociadas a la producción de cultivos. Estas decisiones sirven para gestionar y optimizar la aplicación de insumos y para obtener una producción rentable, de calidad y respetuosa con el medio ambiente. (Ezcaray, 2012).

### *2.6.1 Inicios de la Agricultura de Precisión*

En Estados Unidos durante las décadas de los '70 y '80 se habla del uso de métodos de investigación, en el área agronómica, con el fin de conocer la variabilidad de las plantas y el suelo. Para lo cual se incluyen fotografía del área, análisis de cultivos, muestreos del suelo y análisis de suelo. En el área de ingeniería agrícola se trabajó en la construcción y mejoramiento de las máquinas agrícolas y al mismo tiempo se empezaron a utilizar sensores y Sistema de Posicionamiento Global (GPS), para aplicar insumos de manera óptima y para mapeo, respectivamente. (Chartuni, Pinto, & de Queiroz, 2006).

### *2.6.2 Equipos para Agricultura de Precisión*

Las herramientas más usadas en agricultura de precisión son las siguientes:

#### *2.6.2.1 Sistema de localización GPS*

El Sistema de Posicionamiento Global, conocido por sus siglas en inglés GPS (*Global Positioning System*), es un sistema de navegación, que se basa en la constelación de satélites NAVSTAR (Navegación por Satélite en Tiempo y Distancia) actualmente consta con un total de 24 satélites ubicados en seis planos orbitales, dichos satélites se encuentran en una órbita elíptica aproximada de 20.000 km. Con esta disposición de los satélites se garantiza una cobertura con al menos 4 satélites en cualquier lugar de la Tierra, número mínimo requerido para obtener una posición confiable mediante trilateración. (Ezcaray, 2012)

El sistema GPS fue diseñado con fines militares, aunque actualmente se difundió su uso civil gracias a la gran variedad de disciplinas en las que se puede aplicar, por ejemplo, científicas, como la geodesia y tectónica; en agricultura, para AP; recreacionales o comerciales como el geomarketing. (Claret, Best, & León, 2006)

### *2.6.2.2 Captadores de información agrícola*

Para la creación de cartografía agrícola se pueden asociar la tecnología GPS con los captadores de rendimiento, que como su nombre lo indica, analizan el rendimiento de la planta, el suelo, malas hierbas. Otros captadores son capaces de adquirir y guardar información sobre varios aspectos del terreno como, por ejemplo: textura del suelo, contenido de humedad, nutrientes, nivel de clorofila en la planta e incluso el clima.

### *2.6.2.3 Sensores Remotos*

Los radiómetros, también llamados sensores, son los equipos que permiten medir la radiación electromagnética y registrar la misma en determinada banda del espectro electromagnético, para generar información de fácil interpretación, sea en forma de imagen, de gráfico o de cualquier otro producto. Se pueden clasificar los sensores según el nivel de recolección de la radiación de la siguiente manera: terrestre, suborbital y orbital, dependiendo de la disponibilidad y/o de las necesidades. (Alves, 2006)

### *2.6.2.4 Sistemas de información geográfica (SIG)*

Como definición, un SIG representa a un conjunto de métodos, datos y herramientas que están diseñados para funcionar de forma coordinada y lógica, con el fin de obtener, almacenar, analizar, gestionar y mostrar toda la información geográfica generada junto a sus atributos, con la finalidad de satisfacer múltiples propósitos. (Orellana, Best, & Claret, 2006).

Los SIG ayudan en la solución de problemas que poseen información que sólo se puede relacionar de manera geográfica o espacial. Permite analizar patrones, relaciones y tendencias en la información, para la toma de decisiones. (Orellana, Best, & Claret, 2006)

## 2.7 Estadística Espacial

### 2.7.1 Definiciones

Según Giraldo (2007) la Estadística Espacial es la vinculación de varias metodologías para el análisis de mediciones de variables aleatorias en el espacio. La estadística espacial se puede clasificar en tres grandes áreas, cuyas pertinencias están asociadas a las características del conjunto  $D$  de índices del proceso estocástico de interés. A continuación, se mencionan dichas áreas.

### 2.7.2 Geoestadística

El término geoestadística fue expuesto por G. Matheron en los años 60. En la actualidad la geoestadística es usada para analizar y predecir valores de una variable distribuida en espacio o tiempo. Al contrario de la estadística clásica, los valores no se consideran independientes, se considera de manera implícita que están correlacionados unos con otros, es decir que existe una dependencia espacial. Esto quiere decir que mientras más cercanos estén situados dos puntos, están más correlacionados y mientras más separados hay menos relación entre ellos (Diaz, 2002).

Las ubicaciones  $S$  provienen de un conjunto  $D$  continuo y son seleccionadas a juicio del investigador ( $D$  fijo), lo que significa que el investigador puede seleccionar los puntos a conveniencia o puede seleccionar los sitios bajo algún esquema de muestreo probabilístico. En geoestadística el propósito esencial es la interpolación, por lo tanto, se necesita tener continuidad espacial para poder tener predicciones con sentido (Giraldo, 2007).

### 2.7.3 Lattices

Las ubicaciones  $S$  pertenecen a un conjunto  $D$  discreto y son seleccionadas por el investigador ( $D$  fijo). Estas pueden estar regular o irregularmente espaciadas. Debido a esto la interpolación espacial puede ser carente de sentido con este tipo de datos. (Giraldo, 2007)



#### 2.7.4 *Patrones espaciales*

Las ubicaciones  $s$  pertenecen a un conjunto  $D$  que puede ser discreto o continuo y su selección no depende del investigador ( $D$  aleatorio). En general el propósito de este análisis es determinar si la distribución de los datos dentro de la región es aleatoria, agregada o uniforme. (Giraldo, 2007).

### **2.8 Análisis exploratorio de datos**

#### 2.8.1 *Introducción*

Según Emery (2007) previo al uso de métodos geoestadísticos, se debe realizar un estudio exploratorio de los datos disponibles, el cual tiene tres objetivos:

- Analizar la cantidad, la calidad y la ubicación de los datos.
- Definir las zonas de estudio, para distinguir cambios abruptos en la distribución espacial de valores.
- Analizar la presencia de valores atípicos que se destacan de aquellos de los datos vecinos.

La aplicación de un análisis gráfico, su ubicación geográfica, la evaluación de la forma de la distribución, el cálculo de medidas de localización, variabilidad y correlación es de suma importancia para definir si la aplicación de la teoría geoestadística es válida o para definir que procedimiento de predicción es el más conveniente. (Giraldo, 2007)

#### 2.8.2 *Gráficos exploratorios*

Según Hoaglin et al., (1983) (citado por Giraldo, 2007) como en el caso de un estudio exploratorio clásico se pueden emplear histogramas, diagramas de tallos, hojas, de caja y bigotes, siempre y cuando la información se encuentre debidamente georreferenciada, con el fin de conocer su localización, variabilidad, forma y observaciones extremas.

Los gráficos de dispersión sirven para conocer la relación entre las variables y para la identificación de tendencias de las mismas en la región. Para el análisis geoestadístico es un supuesto fundamental que el fenómeno sea estacionario, para lo cual, el nivel promedio de la variable debe ser constante en todos los puntos del área de estudio. La nube de puntos resultante permite conocer si existe tendencia. (Giraldo, 2007).

## **2.9 Análisis estructural**

El análisis estructural es de los temas de mayor importancia en geoestadística, ya que se encarga de caracterizar la estructura espacial de un fenómeno regionalizado. En este proceso se obtiene el modelo geoestadístico que se acople de mejor manera a la función que se estudia. Dicha función debe reflejar correlación espacial de la variable regionalizada, para esto se modelará la función de covarianzas o la de semivarianzas. (Esparza, et al, 2016)

### *2.9.1 Un enfoque estocástico para la variación espacial*

Matheron al ver lo compleja que es la variación espacial en las propiedades que se encuentran en, sobre o bajo la superficie terrestre, para este análisis buscó un enfoque alternativo al determinista y se aproximó de manera estocástica.

La base de la geoestadística consiste en tratar a las variables de interés como variables aleatorias. Esto quiere decir que, para cada punto  $x$  en el espacio existen valores para una propiedad,  $Z(x)$ , y el valor observado,  $z(x)$ , se extrae aleatoriamente. En  $x$ , una propiedad  $Z(x)$ , es una variable aleatoria con media  $\mu$ , y varianza,  $\sigma^2$ . (Oliver, 2010)

### *2.9.2 Teoría geoestadística y variables regionalizadas*

La geoestadística es la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de fenómenos en el espacio.  $Z(x)$  es la variable medida en el espacio de forma que presenta una estructura de correlación. (Esparza, et al, 2016).

Las variables aleatorias,  $Z(x_1)$ ,  $Z(x_2)$ , ... se encuentran dentro de un proceso aleatorio y el valor observado de  $Z$  es un número cualquiera entre las potenciales realizaciones de este proceso. Por lo tanto, se estima la covarianza espacial para describir esta relación entre pares de puntos; para una variable aleatoria, como:

$$C(x_1, x_2) = E[\{Z(x_1) - \mu(x_1)\}\{Z(x_2) - \mu(x_2)\}] \quad E. 2$$

Dónde:

- $\mu(x_1)$  y  $\mu(x_2)$  son las medias de  $Z$  en  $x_1$  y  $x_2$
- $E$  es el valor esperado.

Al solo existir una realización puntual para  $Z$ , la media es desconocida. Esto hace necesario involucrar el concepto de estacionariedad (Oliver, 2010)

### 2.9.3 Estacionariedad

La variable regionalizada se considera estacionaria si su función es invariante cuando hay un cambio en su posición espacial. (Esparza, et al, 2016).

Se supone que la media  $\mu = E[Z(x)]$  es constante en todo el espacio  $x$ , entonces a  $\mu(x_1)$  y  $\mu(x_2)$  se los puede reemplazar con  $\mu$ . Cuando  $X_1$  y  $X_2$  coinciden, la ecuación E. 2 define la varianza a priori, constante en todas partes. Cuando  $X_1$  y  $X_2$  no coinciden, su covarianza depende de su separación, esto se aplica a un par de puntos  $X_i$  y  $X_j$  separados por  $h = x_i - x_j$  ('lag'), de modo que:

$$\begin{aligned} C(x_i, x_j) &= E[\{Z(x_i) - \mu\}\{Z(x_j) - \mu\}] \\ &= E[\{Z(x)\}\{Z(x+h) - \mu\}] \\ &= C(h) \end{aligned} \quad E. 3$$

La ecuación E. 3 indica que la covarianza es una función de la distancia  $h$ , y esta describe cuantitativamente la dependencia de los valores de  $Z$  con el lag  $h$ . (Oliver, 2010).

Giraldo (2007) dice que  $Z(x)$  es estacionario de segundo orden si cumple:

- El valor esperado de la variable aleatoria es finito y constante para todo  $x$ , en el dominio  $D$ , esto es,

$$E[Z(x)] = \mu, \mu \in R, \forall x \in D \subset R^d \quad E. 4$$

- La función de covarianza existe y sólo depende de la distancia entre las localizaciones involucradas, esto es,

$$COV(Z(x), Z(x+h)) = C(h) < \infty \quad E. 5$$

Existen algunos fenómenos físicos en los que la varianza no es finita. En estos casos se trabaja sólo con la hipótesis que pide que los incrementos  $[Z(x)-Z(x+h)]$  sean estacionarios, a esto se le llama estacionariedad débil, para esto se debe cumplir lo siguiente:

- $Z(x)$  tiene esperanza finita y constante para todo punto en el dominio. Lo que implica que la esperanza de los incrementos es cero.

$$E[Z(x)-Z(x+h)] = 0 \quad E. 6$$

- Para cualquier vector  $h$ , la varianza del incremento está definida y es una función única de la distancia.

$$E\{[Z(x)-Z(x+h)]^2\} = Var[Z(x)-Z(x+h)] = 2\gamma(h) \quad E. 7$$

#### 2.9.4 Estimación del variograma

Para el cálculo de las semivarianzas empíricas de los datos  $z(x_1), z(x_2), \dots$ , el método más usado es el estimador definido por Matheron, cuya ecuación es:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2 \quad E. 8$$

Donde  $m(h)$  es el número de pares  $z(x_i)$  y  $z(x_i + h)$  separados a una distancia  $h$  (Oliver, 2010). El variograma no es una función, sino que se trata de una serie de valores, ya que sólo se puede calcular para vectores  $h$  tales que  $m(h)$  no es vacío. El variograma experimental mide la distancia cuadrática promedio entre los puntos de la nube y la línea diagonal. (Emery, 2007)

Cuando se trata con un transecto  $h$  se convierte en un escalar y debe ser menor a la tercera parte de la longitud total del transecto. Mientras tanto, cuando se trabaja con datos ubicados regular o irregularmente en una o más dimensiones, las separaciones entre pares de puntos se colocan dentro de sectores con límites en distancia y dirección de separación. (Leiva, 2014)

Webster y Oliver (citados por Oliver, 2010) demuestran que se necesitan un mínimo de 100 puntos de muestreo para estimar el variograma de forma fiable, mientras que si se utilizan pocos datos los resultados demuestran no ser buenos. Según Díaz (2002) se deben tener en cuenta algunos parámetros y reglas para estimar el semivariograma:

- Los pares de las observaciones se agrupan dentro de un intervalo  $h = |h|$  con una tolerancia  $\pm \Delta h/2$  y dentro de una dirección  $\theta$  con una tolerancia  $\pm \Delta \theta/2$ , con lo cual el semivariograma estimado se considera regularizado.
- Se estima para valores de  $|h| < d_{\max}/2$ .
- Se considera un número máximo de 25 lags para cualquier propósito, y un mínimo de 10 lags debe ser usado para determinar con precisión el rango y la meseta del semivariograma.

#### 2.9.4.1 Características del Variograma

El variograma representa el cambio de una variable con respecto a la distancia, lo que quiere decir que valores observados en  $Z(x)$  cercanos son similares, mientras que cuando aumenta la distancia (lag), esta similitud va disminuyendo. El variograma puede variar de manera continua y discontinua, dependiendo de varias consideraciones importantes, y de parámetros que se analizan siempre. Estos parámetros son la meseta o sill, el rango o alcance y efecto nugget o pepita. (Oliver, 2010).

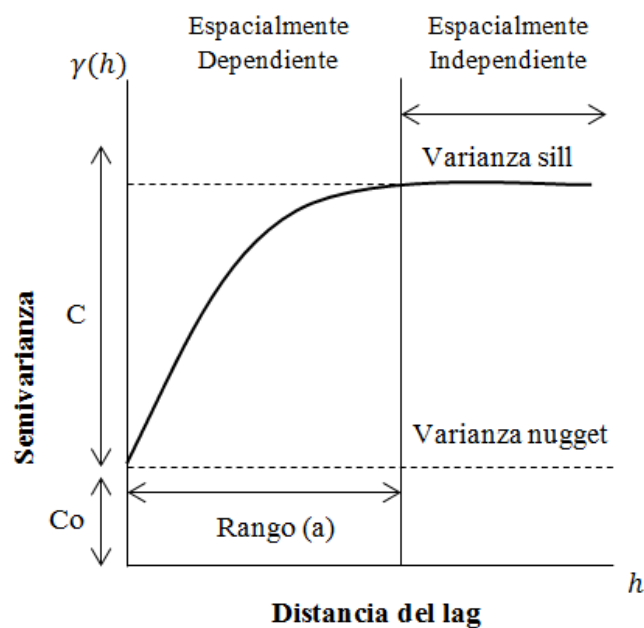


Figura 15, Parámetros del variograma

Fuente: Adaptado de (Oliver, 2010)

- **Efecto pepita (Nugget effect):** se define como una discontinuidad del semivariograma en el origen, esto puede deberse a errores de medición o a la escala de la misma, y se expresa como  $Co$ . Esto comprende principalmente la variación que se produce sobre distancias menores que las más pequeñas del intervalo de muestreo. (Giraldo, 2007)
- **Sill o meseta:** es el límite superior del semivariograma cuando la distancia  $h$  tiende al infinito, puede ser finita o no. Los semivariogramas con una meseta finita se dice que cumplen con una estacionariedad de segundo orden; mientras que cuando es infinita se define como un fenómeno natural que cumple la

hipótesis intrínseca. La meseta se denota por  $C$  o por  $C_0 + C$  cuando existe efecto pepita. (Giraldo, 2007)

- **Rango o alcance:** es la distancia a partir de la cual dos observaciones son independientes. Algunos variogramas no tienen un rango finito, y el variograma se acerca a su meseta asintóticamente. Si el variograma aumenta indefinidamente (variograma no acotado) con el incremento del paso  $h$ , el proceso es solamente intrínseco. (Oliver, 2010).

### 2.9.5 Nube variográfica

El análisis de esta nube permite localizar los pares de datos responsables de los valores altos del variograma experimental y poner en evidencia los datos notablemente diferentes de sus vecinos. La nube variográfica ayuda a estudiar la estabilidad numérica del variograma experimental. Para ello, grafica el valor de todas las diferencias cuadráticas en función de la distancia entre los puntos  $x_i$  y  $x_j$ , como se muestra  $\frac{1}{2} [z(x_i) - z(x_j)]^2$ . Es una herramienta que permite localizar los pares de datos responsables de los valores altos en el cálculo del variograma experimental y poner en evidencia los datos notablemente diferentes de sus vecinos. (Emery, 2007).

### 2.9.6 Modelamiento del variograma

El variograma experimental no puede utilizarse directamente, ya que se encuentra incompleto y sólo está definido para ciertas distancias y direcciones. Además, posee aproximaciones, gracias al número de datos y a los parámetros de tolerancia. Para evitar esto se ajusta a un modelo teórico de variograma en torno al variograma experimental. Esta etapa es la fase esencial de todo estudio geoestadístico, debido a que se interpreta la continuidad espacial de la variable en estudio y a que en todos los cálculos posteriores se utilizará el modelo escogido. (Emery, 2007).

Existen funciones acotadas, como los modelos gaussiano, esférico y exponencial, que representan procesos que son estacionarios de segundo orden, y

funciones no acotadas, como los modelos logarítmicos, potencia y lineal, que representan procesos únicamente intrínsecos. (Oliver, 2010).

Renard & Ors (2014), recalcan lo siguiente:

- la estructura básica incluye covarianzas, variogramas o covarianzas generalizadas
- una covarianza es un variograma en particular (acotado); un variograma (y por lo tanto una covarianza) es una covarianza generalizada en particular
- una estructura es válida para ciertas dimensiones espaciales
- en todas las fórmulas subsiguientes, el valor  $h$  define el módulo de la distancia (isotrópica): por lo tanto, esta distancia es siempre positiva
- algunas covarianzas usan un rango práctico que corresponde a la distancia más allá de la cual la covarianza alcanza el 95% del valor de la meseta (sill).

#### 2.9.6.1 Modelo de Independencia (Nugget Effect)

Se define para cualquier dimensión espacial, y su ecuación es:

$$C(h) = C_o \delta(h) \quad E. 9$$

Donde:

- $C_o$  es la meseta o sill
- $\delta(h)$  es una función que devuelve 1 si  $h=0$ , y 0 para una distancia positiva

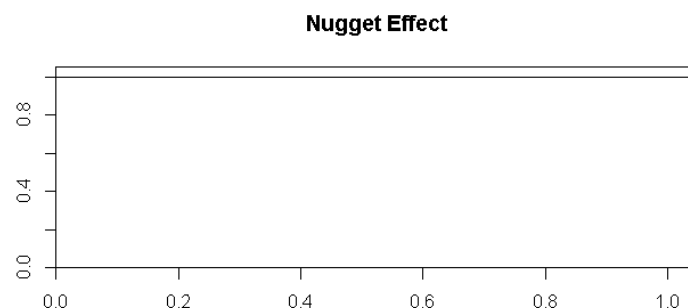


Figura 16, Modelo de Independencia

#### 2.9.6.2 Modelo Exponencial

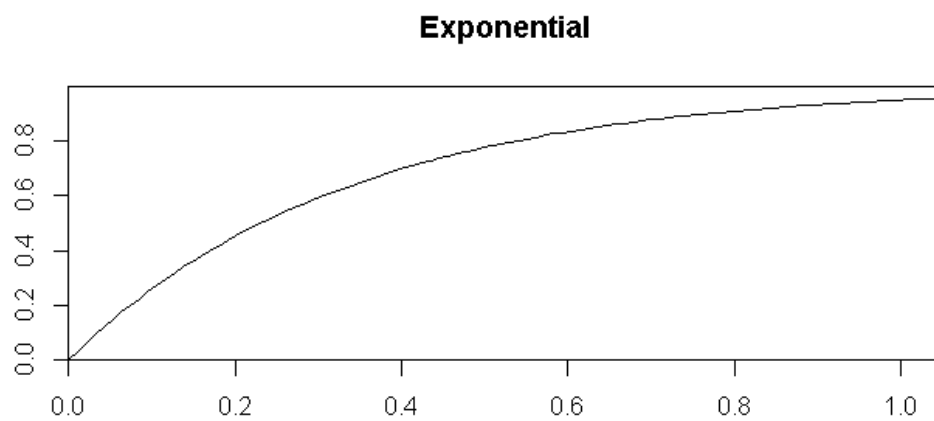


Se define para cualquier dimensión espacial, y su ecuación es:

$$C(h) = C e^{-\frac{h}{a/s}} \quad E.10$$

Donde:

- $C$  es la meseta o sill
- $a$  es el rango
- $s = 2,995732$



*Figura 17, Modelo Exponencial*

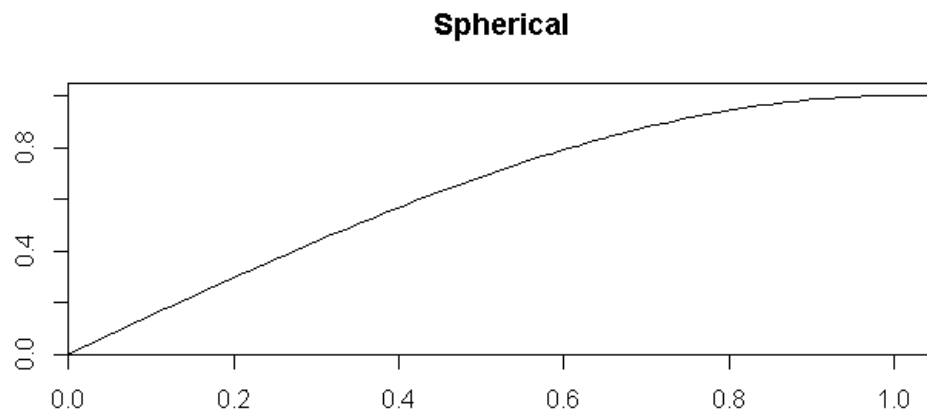
### 2.9.6.3 Modelo esférico

Se define hasta tres dimensiones, y su ecuación es:

$$C(h) = C \left[ 1 - \frac{3h}{2a} + \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad E.11$$

Donde:

- $C$  es la meseta o sill
- $a$  es el rango



*Figura 18, Modelo Esférico*

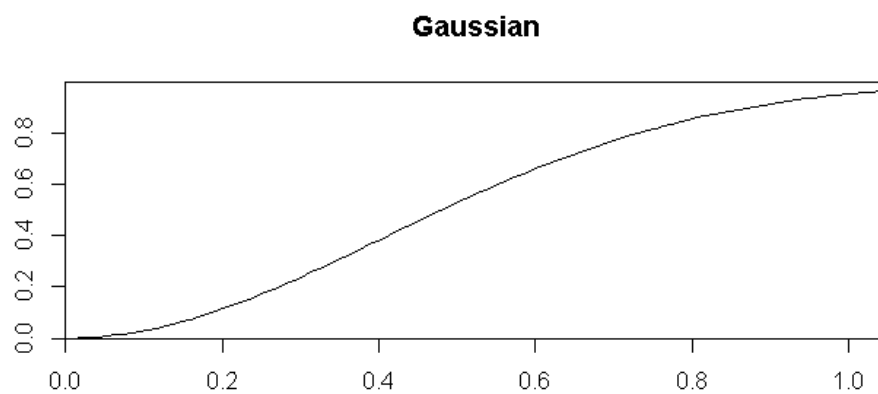
#### 2.9.6.4 Modelo Gaussiano

Se define para cualquier dimensión espacial, y su ecuación es:

$$C(h) = Ce^{-\left(\frac{h}{a/s}\right)^2}$$

E. 12

- $C$  es la meseta o sill
- $a$  es el rango
- $s = 1,730818$



*Figura 19, Modelo Gaussiano*

#### 2.9.6.5 Modelo Gamma

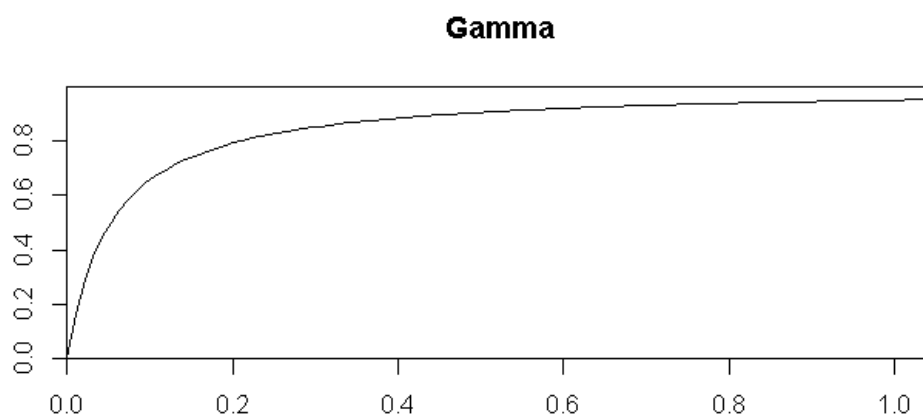
Se define para cualquier dimensión espacial, y su ecuación es:

E. 13

$$C(h) = C \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{h}{a}\right)^\alpha} \right]$$

Donde:

- $C$  es la meseta o sill
- $a$  es el rango
- $\alpha$  es el exponente definido como tercer parámetro



*Figura 20, Modelo Gamma*

Existen otros modelos autorizados que se podrían utilizar para un análisis geoestadístico. Algunos de ellos se detallan a continuación:

- |                                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| • Efecto pepita o Nugget Effect | • Cauchy      |
| • Exponencial                   | • Estable     |
| • Esférico                      | • Lineal      |
| • Gaussiano                     | • Potencia    |
| • Cubico                        | • Orden -1 GC |
| • Cardenal de Seno              | • Cosexp      |
| • J – Bassel                    | • Exp2dfact   |
| • K – Bassel                    | • Expfact     |
| • Gamma                         |               |

Todos estos modelos se pueden encontrar en el paquete *RGeostats* del programa R, cada uno de ellos tiene su gráfica correspondiente. (Renard & Ors, 2014)

## **2.10 Predicción espacial**

La predicción espacial busca estimar o predecir el valor de la variable en el sector estudiado, a partir de los datos disponibles. (Emery, 2007)

### *2.10.1 Predicción espacial óptima*

Se considera como el mejor predictor lineal insesgado al Kriging, que es óptimo en el sentido de insesgado y de varianza mínima. La limitación de los estimadores lineales es solamente del momento de segundo orden de la función aleatoria (la covarianza o el variograma). Este es el método de interpolación de datos dispersos para procesos espaciales aleatorios. (Esparza, y otros, 2016)

### *2.10.2 Características generales del Kriging*

La palabra kriging procede del geólogo sudafricano D. G. Krige, cuyos trabajos realizados en la década del cincuenta, son considerados como los pioneros en los métodos de interpolación espacial. Es un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción. (Giraldo, 2007).

La mayoría de variables medioambientales se las puede medir con un número infinito de lugares y un número infinito de veces, pero es imposible medir todo por razones económicas. Existen algunos métodos determinísticos de interpolación, por ejemplo: polígonos de Thiessen, triangulación, interpolación del vecino natural, función inverso de la distancia, etc..

Laslett et al. (citado por Oliver, 2010), comparó varios de estos métodos de interpolación, y llegó a la conclusión de que Kriging fue el mejor. Kriging toma en cuenta la forma en que una variable se comporta en el espacio, mediante el variograma o la covarianza. Consideró una serie de características:

- El kriging analiza la distancia, la geometría de la localización y puede dar pesos a las muestras, a diferencia de los métodos tradicionales.
- El kriging minimiza la diferencia entre el valor real y el predicho.
- En la interpolación se pueden estimar valores puntuales o en bloques.
- Kriging estima la varianza en todos los puntos del modelamiento, a diferencia de los métodos tradicionales.
- El método kriging permite evitar un error sistemático, pero no necesariamente realiza la mejor predicción

Giraldo (2007) indica que se pueden clasificar los predictores Kriging y sus propiedades de la siguiente manera.

Lineal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple</li> <li>• Ordinario</li> <li>• Universal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son óptimos si hay normalidad multivariada</li> <li>• Independientemente de la distribución son los mejores predictores lineales insesgados</li> </ul>
No Lineal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indicador</li> <li>• Probabilístico</li> <li>• Lognormal, TransGaussiano, Disyuntivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son predictores óptimos</li> </ul>

Según Oliver (2010) el Kriging ordinario es el método mas robusto, por lo tanto es el que con mayor frecuencia se utiliza.

### 2.10.2.1 *Kriging ordinario para mapeo*

El Kriging ordinario se basa en el supuesto de que no se conoce la media.

Se considera que se realizaron mediciones de la variable de interés  $Z$  en los puntos de muestreo  $x_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , es decir de la forma  $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ , y a partir de esta información se desea predecir  $Z(x_0)$ , en el punto  $x_0$ . Por lo tanto se puede decir que la variable puede predecirse como una combinación lineal de las  $n$  variables aleatorias, así:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad E. 14$$

Donde:

- $n$  usualmente representa los puntos de dato dentro de la vecindad local
- $\lambda_i$  representa los pesos o ponderaciones de los valores originales, se los calcula en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto que se desea predecir. La suma de los pesos debe ser igual a uno para que la esperanza del predictor sea igual a la esperanza de la variable.

Si:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad E. 15$$

Entonces:

$$E(\hat{Z}(x_0)) = E(Z(x_0)) \quad E. 16$$

En este caso  $\hat{Z}(x_0)$  es el mejor predictor lineal, porque los pesos se obtienen de tal manera, que minimizan la varianza del error de predicción que se representa de la siguiente forma:

$$V(\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)) \quad E. 17$$

Por lo tanto la varianza de predicción es:

$$\begin{aligned}
 V(\hat{Z}(x_0)) &= E\left[\{\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\}^2\right] \\
 &= 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j)
 \end{aligned}
 \tag{E. 18}$$

En donde:

- $\gamma(x_i, x_j)$  es la semivarianza de Z entre los puntos  $x_i$  y  $x_j$
- $\gamma(x_i, x_0)$  es la semivarianza entre el i-ésimo punto de muestreo y el punto objetivo  $x_0$ .

Las semivarianzas se derivan del modelo de variograma porque las semivarianzas experimentales son discretas y a distancias limitadas. La ecuación conduce a un conjunto de  $n+1$  ecuaciones con  $n+1$  incógnitas.

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \psi(x_0) &= \gamma(x_i, x_0) \quad \text{Para todo } j \\
 \sum_{i=1}^n \lambda_i &= 1
 \end{aligned}
 \tag{E. 19}$$

En donde:

- El multiplicador de Lagrange,  $\psi(x_0)$ , se introduce para alcanzar la minimización.
- Los pesos,  $\lambda_i$ , se insertan en la ecuación E. 16 para dar la predicción de Z en  $x_0$ .

La varianza de predicción de Kriging es luego obtenida como:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \psi(x_0)
 \tag{E. 20}$$

Kriging puntual es un interpolador exacto, el valor calculado es valor observado y la varianza de predicción es cero.

Los valores se estiman en los nodos de una malla fina (grid) y la variación se pueden visualizar por isolíneas o por modelos digitales. Las varianzas Kriging o errores

estándar se pueden asignar de manera similar y son una guía de la fiabilidad de las predicciones (Oliver, 2010).

#### 2.10.2.2 *Pesos Kriging*

Los pesos en kriging dependen del variograma y de la forma en que se tomaron las muestras. Los pesos se asignan dentro de un radio de búsqueda, a diferencia de interpoladores tradicionales, donde los pesos se asignan arbitrariamente. Los pesos varían de acuerdo a cambios en la proporción entre el efecto pepita y la meseta, el rango del variograma, el tipo de modelo, la configuración del muestreo y el efecto de la anisotropía; siendo los más sensibles la configuración del muestreo y la anisotropía (Webster & Oliver, 2007, citado en Oliver, 2010).

Los pesos tienen mayor ponderación mientras más cerca de un punto se encuentran, lo que indica que kriging es un predictor local. Cuando la proporción entre efecto pepita y meseta se incrementa los pesos cerca del objetivo decrecen y los que están más lejos aumentan. En un modelo de variograma de estilo pepita puro, los pesos son iguales y la estimación es simplemente la media de los valores en la vecindad. Para los datos que se distribuyen de manera irregular, los puntos que se agrupan llevan menos peso individual que los que están aislados. El hecho de que los puntos más cercanos al objetivo general llevan el mayor peso tiene implicaciones prácticas. Esto significa que la zona de búsqueda necesita contener no más de 16-20 datos (Oliver, 2010).

#### 2.10.2.3 *Validación cruzada*

Existen diferentes métodos que se pueden emplear en la evaluación del ajuste del modelo de variograma elegido y por tanto de las predicciones hechas con Kriging. El método más empleado es el denominado, validación cruzada, que consiste en excluir una observación dentro de las  $n$  observaciones, mientras que con el resto de las observaciones, que corresponden a  $n-1$  observaciones, y el modelo escogido de variograma, se predice el valor de la observación. Si el modelo de semivarianza elegido es el correcto, por lo tanto describe bien la estructura de autocorrelación espacial, la diferencia entre el valor observado y el valor predicho debe ser pequeña.



El proceso se repite para cada una de las observaciones. El resultado que se obtiene es un conjunto de  $n$  errores de predicción. (Giraldo, 2007)

### 2.10.3 Verificación del Modelo

Según Oliver (2010), para verificar un modelo interpolado se usan dos medidas de precisión:

- Error Medio

Es el promedio de la suma de la diferencia entre el valor observado ( $x_i$ ) y el valor estimado  $\hat{z}(x_i)$ , que es definido también como el sesgo o error de la predicción.  $N$  es el número de puntos utilizados. El valor de ME debe ser pequeño (cercano a cero), lo que indica que el método presenta pocos errores. Pero esta medida aun así no describe la magnitud de los errores que pueden ocurrir. La ecuación que permite calcular el Error Medio es:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)\} \quad E. 21$$

- Error Cuadrático Medio

Es la suma de los residuos al cuadrado (varianza de los residuos) en donde valores pequeños indican predicciones más precisas punto por punto. La ecuación que permite calcular el Error Cuadrático Medio es:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{[Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)]\}^2 \quad E. 22$$

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Generalidades

La metodología se definió en cuatro fases que en términos generales del proyecto se definen como:

- Fase 1 (Modelo de NDVI mediante UAV)
- Fase 2 (Validación de los sensores)
- Fase 3 (Modelo geoestadístico de NDVI)
- Fase 4 (Análisis y comparación de datos)

Estas fases del proyecto se detallan en un flujograma de trabajo, (ver Figura 21).

El presente estudio plantea buscar una relación entre modelos de NDVI, obtenidos con dos sensores espectrales. Estos sensores fueron contrastados inicialmente en una prueba de laboratorio en condiciones controladas donde se pudo obtener como primer resultado un reporte estadístico de la comparación de los valores de NDVI observados.

A continuación, se realizó el estudio en una parcela de pastos en la Hacienda el Prado, IASA I. Los datos se colectaron en el mes de enero del 2017 cuándo se encontraba en etapa previa al pastoreo. Con esta premisa, se recolectó su respuesta espectral mediante dos plataformas; una aerotransportada que consta de un sensor multiespectral montado en un UAV y otra terrestre mediante un espectrorradiómetro. Esta respuesta espectral fue procesada en ambos casos para obtener una comparación estadística entre sensores en condiciones reales. Esta información sirvió para obtener un modelo de *NDVI*, denominados de ahora en adelante modelo NDVI (1), para el generado con el sensor Parrot Sequoia y modelo NDVI (2) para el generado con el

espectrorradiómetro FieldSpec 4. Estos índices fueron analizados para definir una correlación entre los dos productos.

### *3.1.1 Materiales*

- Equipos
  - 1 sensor multiespectral Parrot Sequoia
  - 1 UAV, DJI Matrice 100
  - 1 Espectrorradiómetro FieldSpec 4
  - 1 sistema GNSS Trimble R8 (Base y Móvil)
- Software
  - Pix 4D
  - Trimble Business Centre
  - RS<sup>3</sup>
  - ViewSpecPro
  - R
    - RGeostats
    - Sp
    - rcmdr
  - QGIS

### *3.1.2 Métodos*

#### *3.1.2.1 Fotogrametría*

La aplicación de esta técnica permitió la obtención de información por medio de la captura y reconstrucción de imágenes aéreas. En este caso se aplicó el mismo principio para la recolección de datos espectrales mediante el sensor Parrot Sequoia montado en un UAV. Como producto final se obtuvo un ortomosaico con información espectral de la zona de interés.

#### *3.1.2.2 FastStatic*

Este método de rastreo GNSS se utilizó para dar coordenadas de alta precisión a una base que posteriormente serviría como apoyo para obtener todos los procesamientos en modo RTK

#### *3.1.2.3 RTK*

Se manejó este método de posicionamiento GNSS para dar coordenadas georreferenciadas a los puntos de control fotogramétrico utilizados para la generación de los ortomosaicos.

#### *3.1.2.4 Replanteo RTK*

Para la colección de datos espectrales con el sensor FieldSpec 4, se obtuvo un modelo de muestreo cuyos puntos serían ubicados con exactitud en el terreno mediante la aplicación de esta técnica de posicionamiento.

#### *3.1.2.5 Colección de datos espectrales (Espectrorradiómetro)*

Para la colecta de datos espectrales se utilizó el sensor FieldSpec 4. Este espectrorradiómetro tiene la capacidad de medir y almacenar la respuesta espectral en un rango comprendido entre 350 – 2500 nm. Como característica adicional, se puede mencionar que este sensor puede trabajar bajo cualquier condición atmosférica, ya que al inicio de la captura de datos se realiza una calibración por medio de un *Spectralon*.

#### *3.1.2.6 Geoestadística*

Para obtener el segundo modelo de NDVI con los datos del sensor terrestre Field Spec, se utiliza esta técnica que busca predecir los valores de NDVI a partir de los datos obtenidos.

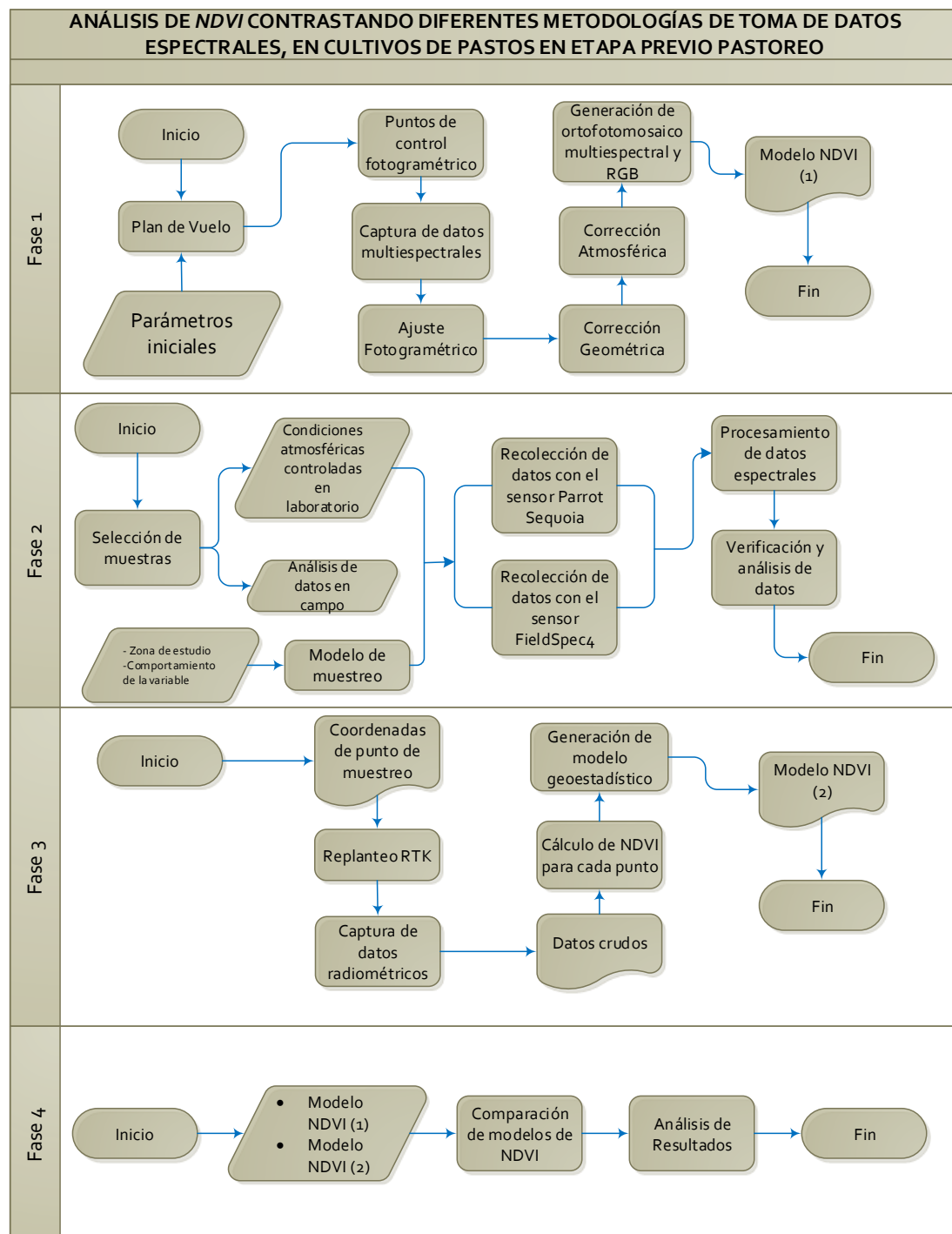


Figura 21, Diagrama de flujo de la metodología del proyecto

### 3.2 Levantamiento de información con UAV (Fase 1)

### 3.2.1 Plan de vuelo

Para realizar el plan de vuelo es importante conocer la zona de estudio, y observar variables que puedan afectar a la seguridad. Con este conocimiento se puede delimitar una zona de estudio adecuada. El plan de vuelo fue realizado en la aplicación de escritorio *Mission Planner*, que permite ingresar la delimitación de la zona de vuelo y los parámetros de vuelo indicados en la Tabla 3. El tamaño de píxel o GSD resultante es calculado automáticamente por la aplicación tomando en cuenta las variables mencionadas, así como las características del programa. Esta configuración se puede observar en la Figura 22.

Tabla 3

*Parámetros iniciales y resultantes del plan de vuelo*

<b>Parámetros Ingresados</b>	Altura de Vuelo	120 m
	Traslapo Longitudinal	80 %
	Traslapo Transversal	70 %
	Área	4,75 ha
<b>Parámetros Resultantes</b>	GSD (resultante)	0,1131 m
	Tiempo de vuelo	5:19 min
	Número de imágenes	50
	Líneas de vuelo	4



Figura 22, Plan de vuelo en el software Mission Planner

### 3.2.2 Puntos de control fotogramétrico

Fueron determinados cinco puntos de control horizontal dentro de la zona de estudio, distribuidos de tal forma que cubra prácticamente toda el área de vuelo. Estos puntos, que se utilizaron dentro del proceso de ajuste para generación de la ortofoto, fueron materializados en el terreno con mojoncillos cilíndricos de 15 cm. de diámetro y estacas. Posteriormente, se obtuvieron las coordenadas de dichos puntos con la utilización del método GPS RTK, utilizando como base un punto posicionado previamente mediante el modo *Fast Static*. Para lograr esto último, se utilizó la infraestructura de monitoreo continuo del Ecuador (REGME), empleando concretamente la estación EPEC y estableciendo el marco de referencia SIRGAS ECUADOR.

- Marco de referencia IGB08
- Referencia ITRF2008



*Figura 23, Distribución de puntos de control fotogramétrico*

*Fuente: ortofoto Escala 1:5000 (GAD del cantón Rumiñahui, 2010)*

### *3.2.3 Captura de información*

En la fase de prospección de la zona de vuelo, se identificó que al este de la zona de estudio existe un bosque de eucaliptos en una zona de pendiente mayor al 80% en la que los obstáculos sobrepasan los 120 metros de altura respecto al punto de partida del UAV. Esta altura es la máxima permitida a nivel internacional (Agencia Estatal de Seguridad Aérea, 2014), es por ello que, por razones de seguridad se decidió cambiar la metodología planteada inicialmente y se procedió a volar en modo manual. Esto fue posible gracias a las características del Matrice 100, ya que este UAV permite añadir una segunda cámara de apoyo al vuelo. En este caso se utilizó la cámara Zenmuse X3. Esta cámara se utilizó exclusivamente para enfocar el horizonte en el trayecto del UAV, y así poder esquivar posibles obstáculos. Para precautelar una



posible falta de información, se añadieron dos líneas de vuelo adicionales a las del plan de vuelo.

### 3.2.4 Ajuste del proyecto fotogramétrico

Para realizar el ajuste del proyecto fotogramétrico se utilizó el software Pix4D, que es capaz de realizar un ajuste del vuelo con las coordenadas de los centros de exposición de cada imagen, para luego realizar la aéreo-triangulación. Estas coordenadas son capturadas durante el vuelo con el GPS del sensor de luz, llegando a una precisión de  $\pm 1,5$  m. Toda la reconstrucción del bloque fotogramétrico se realiza de manera automática ya que el software reconoce y procesa el archivo *.exif* adjunto a cada imagen. Este archivo contiene la orientación interna y los ángulos omega, phi y kappa de cada imagen.

Finalizada la reconstrucción del bloque fotogramétrico, el software genera *Tie Points* o puntos de amarre, que son puntos en común ubicados en las distintas imágenes y que sirven para enlazarlas entre sí y formar el ortofotomosaico. Cabe mencionar que todo este proceso es completamente automatizado.

#### 3.2.4.1 Corrección geométrica

Se importaron al citado software las coordenadas de los puntos de control fotogramétrico o *GCP* por sus siglas en inglés. Estos puntos sirven para ajustar el proyecto fotogramétrico al marco de referencia SIRGAS – Ecuador.- El software reconoce automáticamente en qué imágenes se pueden ubicar estos GCP para que sea más sencillo el proceso de pinchado de dichos puntos sobre la imagen (Figura 24). Posteriormente utilizará estas imágenes y puntos marcados para ortorectificar el producto.

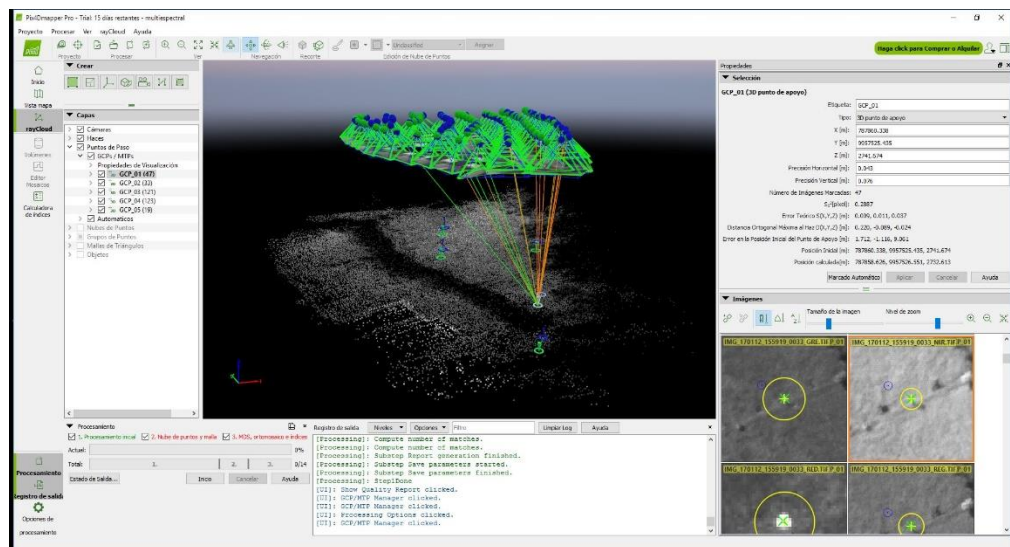
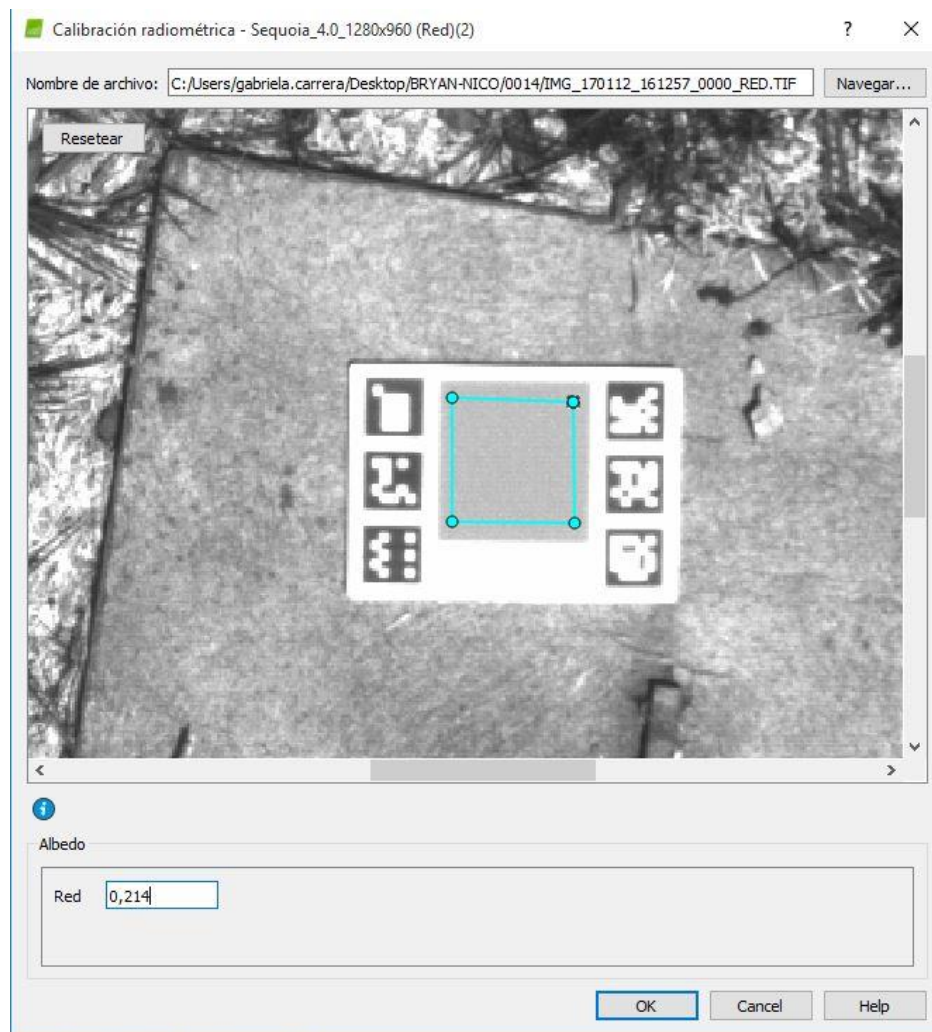


Figura 24, Corrección geométrica mediante GCP

Fuente: Módulo AG del software Pix4D (Pix4D, 2017)

### 3.2.4.2 Corrección atmosférica

Para realizar esta corrección es necesario que al momento que finalice el vuelo, se realice una captura adicional del panel de reflectancia AIRINOV con el sensor multiespectral. De esta forma, el módulo AG del software Pix4D, permite ingresar las imágenes del panel para realizar la corrección atmosférica. De esta forma, se pueden enlazar los datos obtenidos por el sensor de luz para realizar la corrección con los valores de reflectancia capturados por el sensor, todo en relación a los valores de albedo predeterminados en el panel para cada banda espectral.



*Figura 25, Calibración atmosférica mediante valores de albedo del panel AIRINOV*

*Fuente: Módulo AG del software Pix4D (Pix4D, 2017)*

### 3.2.5 Generación del ortofotomosaico

Una vez finalizado el ajuste, el software genera cinco mosaicos ortorectificados, uno para cada cañón del sensor Parrot Sequoia, es decir:

- 1 ortofotomosaico para el rojo
- 1 ortofotomosaico para el verde
- 1 ortofotomosaico para el infrarrojo cercano
- 1 ortofotomosaico para el *rededge*
- 1 ortofotomosaico en RGB

Adicionalmente se genera un reporte de todos los parámetros del proceso, en el cual se pueden observar los residuales de cada proceso del ajuste fotogramétrico.

### 3.2.6 Cálculo del Modelo NDVI (1)

Para calcular el modelo NDVI, el propio software cuenta con una calculadora que viene programada ya con la ecuación (E. 1), que permite calcular el citado índice. Este modelo finalmente se exportó como un archivo de imagen en formato *.tif* compatible con cualquier plataforma SIG.

## 3.3 Validación de sensores espectrales (Fase 2)

### 3.3.1 Análisis de datos en laboratorio

Como primer paso de esta investigación se planteó buscar una correlación entre los resultados obtenidos con cada sensor. Para poder corroborar esto es necesario que los datos obtenidos con cada uno de estos sensores no se encuentren afectados por variables atmosféricas. Es por lo que en una primera fase se resolvió analizar datos de los sensores Parrot Sequoia y FieldSpec4 bajo condiciones controladas en laboratorio.

#### 3.3.1.1 Selección de muestras

Para el análisis de los sensores en condiciones controladas, se seleccionaron tres especies de tipo vegetal, además de dos paneles de calibración de cada equipo.

*Tabla 4*

*Muestras seleccionadas para muestreo en laboratorio.*

# Muestra	Código
<b>Muestra 1</b>	Hoja (1-2)
<b>Muestra 2</b>	Planta (1-2)
<b>Muestra 3</b>	Pasto (1-2)
<b>Muestra 4</b>	Calibración (2-3)

<b>Muestra 5</b>	Target (1-2)
<b>Muestra 6</b>	Negro (1-2)

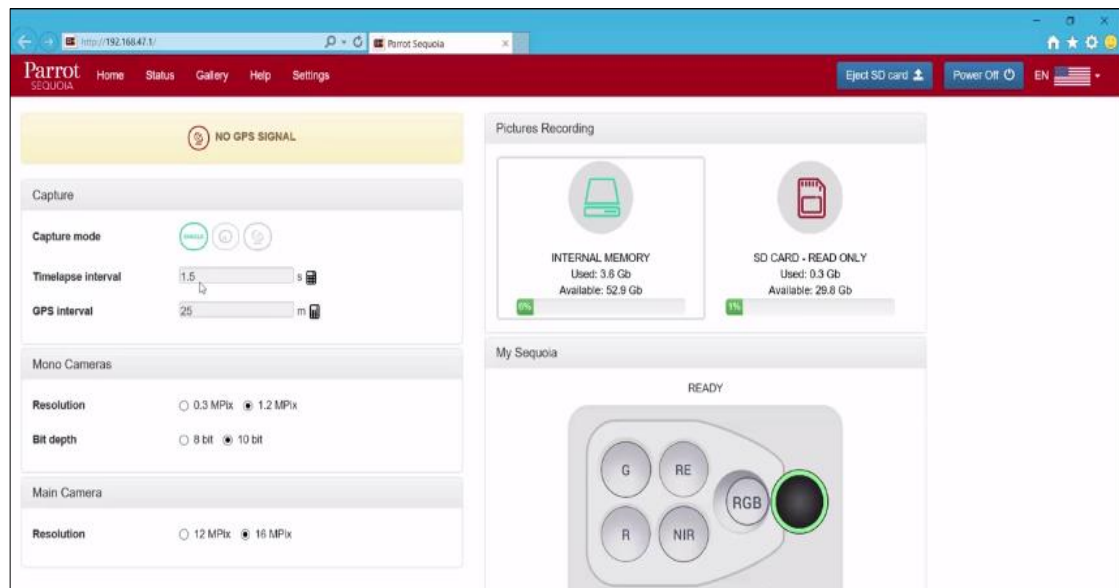
### 3.3.1.2 Condiciones controladas de laboratorio

Para la captura de datos espectrales en esta fase, se minimizaron los efectos atmosféricos o ambientales que puedan alterar los datos obtenidos de las mediciones de cada sensor. Por este motivo, se llevó a cabo la prueba en el laboratorio del área de investigaciones espaciales del Instituto Espacial Ecuatoriano, en donde se pudieron controlar algunas condiciones ambientales y atmosféricas para convertirlas en constantes para todas las mediciones.

Se controló como aspecto principal la luz, la cual incide directamente en la absorción de energía captada por los sensores. Para lograr un control total de la misma se utilizó una lámpara de reflectancia. Esta lámpara actúa como una fuente de luz fija diseñada específicamente para mediciones precisas de reflectancia difusa en interiores. Un último condicionante a tener en cuenta es la distancia entre el objeto y el sensor. Para mantener la distancia constante se ubicó este el sensor sobre un pedestal de tal forma que cada captura tuviera exactamente la distancia deseada para cada toma.

### 3.3.1.3 Recolección de datos (Parrot Sequoia)

El sensor multiespectral Parrot Sequoia al ser un equipo multipixel, permite que cada pixel de la imagen digital tenga su propio valor digital de reflectancia. Conocido esto, para realizar este experimento se trabajó sin el sensor de luz solar que incorpora ya que alteraría las condiciones controladas que se expusieron anteriormente. Para configurar el sensor es necesario conectar un dispositivo a la cámara mediante Wi-Fi a una red cuyo *Hostname* es: Sequoia\_XXXX. Posterior a esto, desde el navegador del dispositivo se conecta a la siguiente IP: 192.168.47.1 ver Figura 26, se realiza una calibración del sensor girándolo sobre sus ejes y finalmente desde el propio dispositivo se ordena la captura de imágenes manualmente.



*Figura 26, Interfaz HTML de configuración Parrot Sequoia*

#### *3.3.1.4 Recolección de datos (FieldSpec4)*

El espectrorradiómetro FieldSpec4 es un sensor monopixel, es decir, la medición que realiza es de todo lo que se encuentra en su campo de visión (FOV). El valor de esta variable puede ser de 25°, 8° o 1° dependiendo de la lente que se utilice. De acuerdo a las muestras elegidas, se fija un tamaño de pixel que podría cambiarse en función del tamaño del objeto a medir, y se calcula la altura con la siguiente ecuación (E. 23)

$$\frac{Px}{2} = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * h \quad \text{E. 23}$$

Donde:

- Px es el tamaño del pixel a calcular
- h es la altura
- $\theta$  es el FOV del sensor

*Tabla 5*

*Altura de captura en función al tamaño del objeto y el FOV*

FOV	FOV rad	Tamaño obj. (cm)	h_25 (cm)	h_8 (cm)	h_1 (cm)
<b>25</b>	0,436332	1	2,255354	7,150333	57,29433
<b>8</b>	0,139626	2	4,510709	14,30067	114,5887
<b>1</b>	0,017453	3	6,766063	21,451	171,883
		4	9,021417	28,60133	229,1773
		5	11,27677	35,75167	286,4716
		6	13,53213	42,902	343,766
		7	15,78748	50,05233	401,0603
		8	18,04283	57,20267	458,3546
		9	20,29819	64,353	515,6489
		10	22,55354	71,50333	572,9433
		11	24,8089	78,65366	630,2376
		12	27,06425	85,804	687,5319
		13	29,31961	92,95433	744,8262
		14	31,57496	100,1047	802,1206
		15	33,83031	107,255	859,4149

Definido el tamaño del objeto, se calcula la altura de captura para el espectrorradiómetro resumida en la (Tabla 5) y se fija el sensor en el pedestal. Se procedió a configurar el sensor mediante el software RS<sup>3</sup> (ver Figura 27), en donde se puede calibrar el blanco. Este proceso se realiza con un *Spectralon* (Figura 28) que es un panel que posee la más alta reflectancia sobre las regiones del espectro debido a su material de fluoropolímero. Seguidamente se procede a realizar las mediciones de las muestras seleccionadas. Para cada muestra se eligen cuántas observaciones se deben realizar. En este caso se utilizaron diez, para evitar que cualquier cambio momentáneo afecte al resultado. Estos datos son almacenados en el PC que controla mediante una conexión Wi-Fi al equipo.

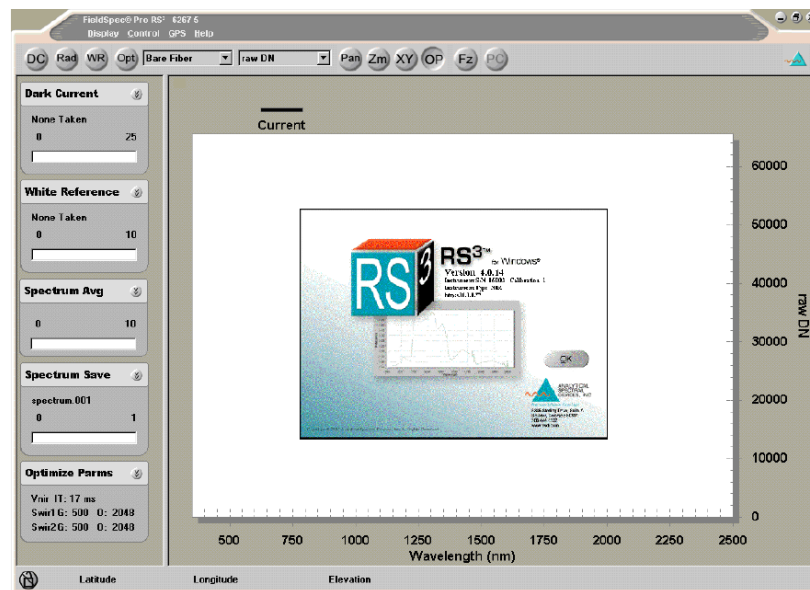


Figura 27, Interfaz RS<sup>3</sup>



Figura 28, Spectralon de la firma ASD Inc.

### 3.3.1.5 Procesamiento de datos espectrales

Al finalizar la captura de datos se realiza su descarga para cada sensor. Cabe mencionar que los ficheros que contienen los datos aparecen en distintos formatos que serán descritos a continuación:



- Sensor multiespectral Parrot Sequoia

Finalizado el muestreo, se procedió a la descarga de datos en bruto. Los que se encuentran en la memoria interna de la cámara. Para ello se utilizó el mismo aplicativo web descrito anteriormente para su configuración. Estos archivos son de tipo imagen que para el caso de las bandas del *green*, *red*, *near infrared* y *rededge* se encuentran en formato *.tif* y para la composición RGB se encuentran en formato *.jpg* (ver Figura 29).

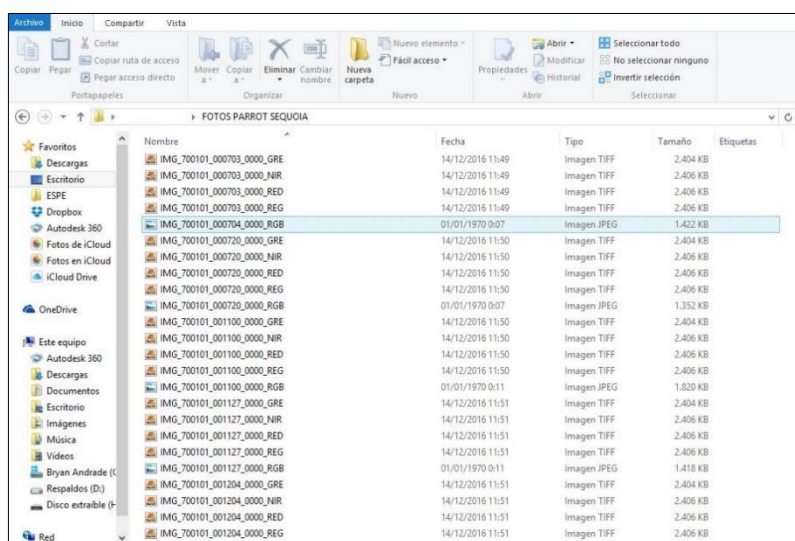
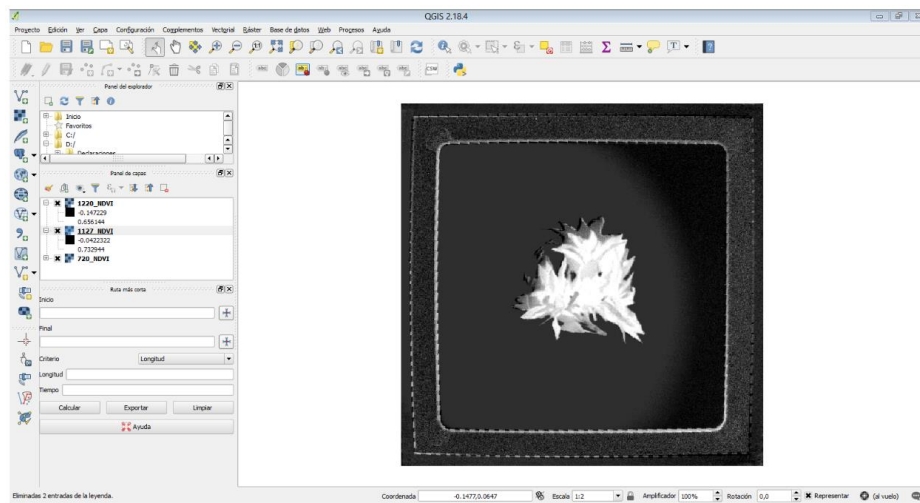


Figura 29, Archivos brutos del sensor Parrot Sequoia

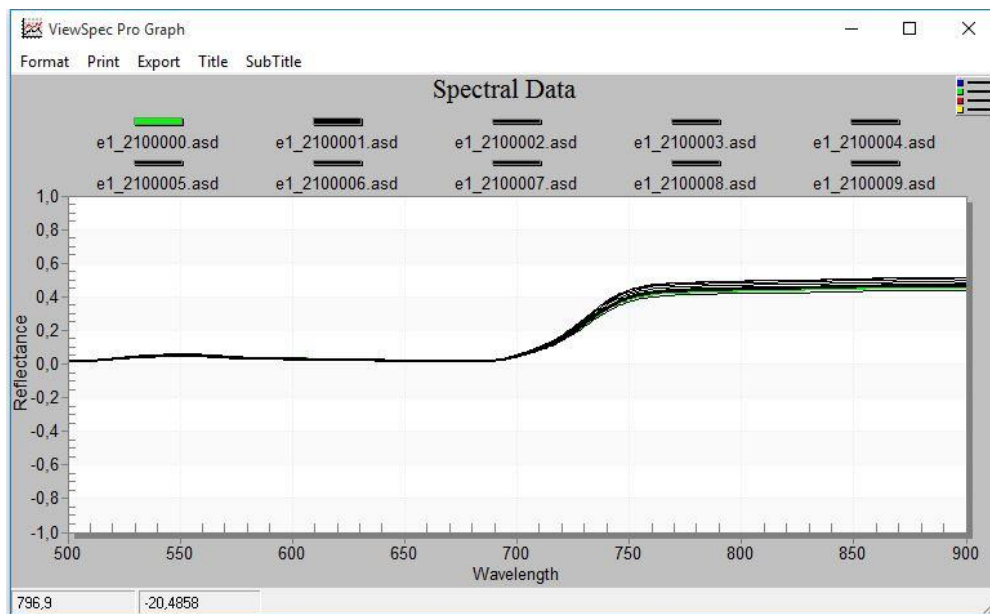
Para generar el modelo NDVI usado en la comparación de los sensores se utilizan las bandas del rojo e infrarrojo. Dichas imágenes, por características físicas del sensor se encuentran desplazadas la una respecto a la otra, sin variar el número de filas y columnas. Debido a esta característica del sensor se procedió a referenciar una imagen respecto a la otra sin que esta cambie sus valores digitales, para luego obtener el índice de vegetación mediante la ecuación (E. 1), utilizando la calculadora de ráster del software QGIS (ver Figura 30). Para poder comparar estos datos con los del espectrorradiómetro FieldSpec 4, fue necesario realizar una máscara de la zona de interés ya que el ráster resultante captura objetos alrededor de la muestra debido a que el campo de visión del sensor es de  $89^\circ$ .



*Figura 30, NDVI de una muestra analizada en laboratorio*

- Espectrorradiómetro FieldSpec4

La descarga de datos en bruto de este sensor se realiza directamente desde el explorador de archivos de la computadora que almacena la información durante el muestreo. Estos archivos se encuentran en un formato nativo con extensión *.asd* que serán postprocesados en el software ViewSpecPro. Como primer paso se verifica que los datos estén correctos, verificando la respuesta espectral (Figura 31) y observando si existen inconsistencias en cada una de las mediciones realizadas. Posterior a esto se exporta la reflectancia resultante en un archivo *.txt* que contiene la longitud de onda y su respectivo valor de reflectancia.



*Figura 31, Respuesta espectral de una muestra de pasto*

*Fuente: Software ViewSpecPro*

Para calcular el NDVI usado en la comparación de los sensores, se exportó el archivo *.txt* y se abrió en la aplicación Microsoft Excel, donde se filtraron las longitudes de onda con las que trabaja el sensor multiespectral Parrot Sequoia. En concreto, para las bandas del Rojo (640-680) nm e Infrarrojo cercano (770-810) nm. De esta forma, para los valores de reflectancia se obtuvo una media de las mediciones realizadas y posteriormente se calculó la media de estos valores para cada banda (Figura 32), a las que se denominó pseudobandas espectrales. Para terminar con esta parte, las citadas pseudobandas fueron utilizadas para calcular el valor final de NDVI mediante la ecuación (E. 1).

	WL	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	Prom
<b>R</b>	640	0,931	0,922	0,947	0,922	1,008	1,094	1,14	1,047	1,113	1,059	1,018
	641	0,948	0,95	0,983	0,962	1,01	1,1	1,14	1,084	1,11	1,026	1,031
	642	0,979	0,983	1,026	0,996	1,015	1,118	1,148	1,131	1,12	1,043	1,056
	643	1,033	0,994	1,019	0,98	1,044	1,142	1,213	1,162	1,13	1,11	1,083
	644	1,073	1,113	1,084	1,047	1,11	1,232	1,271	1,233	1,246	1,194	1,160
	645	1,044	1,089	1,081	1,073	1,073	1,216	1,223	1,198	1,242	1,158	1,140
	646	0,993	0,948	1,011	1,006	0,991	1,111	1,113	1,089	1,122	1,05	1,043
	647	0,996	0,882	0,964	0,885	1,011	1,048	1,048	1,032	1,045	1,009	0,992
	648	0,908	0,871	0,936	0,9	1,006	1,002	1,011	1,008	1,043	0,982	0,967
	649	0,898	0,911	0,971	0,971	1,028	1,03	1,019	1,035	1,094	1,018	0,998
	650	0,983	0,975	1,061	1,03	1,079	1,133	1,074	1,101	1,161	1,113	1,071
	651	0,996	0,982	1,09	1,006	1,047	1,19	1,135	1,137	1,171	1,146	1,085
	652	0,931	0,973	1,043	0,947	1	1,198	1,125	1,135	1,151	1,122	1,063
	653	0,945	0,982	1	0,929	1,005	1,158	1,13	1,108	1,091	1,086	1,043
	654	0,953	1,002	1,001	0,968	1,066	1,091	1,183	1,069	1,006	1,07	1,041
	655	0,871	0,907	0,953	0,922	1,019	1,062	1,077	1,026	1,039	1,06	0,994
	656	0,928	0,877	0,979	0,974	1,041	1,111	1,082	1,032	1,124	1,091	1,024
	657	1,025	0,941	1,03	1,063	1,098	1,185	1,188	1,085	1,19	1,127	1,093
	658	0,95	1,027	0,996	1,038	1,081	1,185	1,24	1,137	1,154	1,1	1,091
	659	0,923	0,951	0,982	1,014	1,1	1,147	1,152	1,127	1,098	1,032	1,053
660	0,972	0,936	1,013	0,997	1,092	1,131	1,128	1,128	1,122	1,058	1,058	
661	1,014	0,974	1,045	0,984	1,048	1,13	1,159	1,129	1,174	1,139	1,080	
662	0,903	0,893	0,989	0,98	1,019	1,095	1,092	1,066	1,092	1,104	1,023	
663	0,914	0,885	0,98	0,984	1,085	1,073	1,11	1,078	1,134	1,116	1,036	
664	0,93	0,907	0,957	0,929	1,056	1,036	1,102	1,097	1,147	1,093	1,025	
665	0,898	0,927	0,931	0,87	0,932	1,014	1,055	1,094	1,089	1,041	0,985	
666	0,939	0,988	1,06	1,059	1,045	1,129	1,178	1,14	1,169	1,152	1,086	
667	0,975	0,969	1,034	1,128	1,082	1,154	1,194	1,116	1,178	1,139	1,097	
668	0,997	0,934	0,992	1,077	1,052	1,143	1,164	1,09	1,164	1,097	1,071	
669	1,019	0,966	1,094	1,035	1,057	1,19	1,203	1,137	1,205	1,158	1,106	
670	1,006	1,035	1,126	1,07	1,14	1,191	1,239	1,176	1,207	1,16	1,135	
671	0,945	1,003	1,028	1,013	1,047	1,139	1,17	1,135	1,129	1,107	1,072	
672	0,891	0,939	0,946	0,943	0,925	1,095	1,103	1,056	1,063	1,062	1,002	
673	0,886	0,946	1,013	0,977	0,974	1,102	1,157	1,01	1,09	1,068	1,022	
674	0,891	0,944	1,051	0,943	1,018	1,098	1,151	1,055	1,113	1,078	1,034	
675	0,934	0,951	1,073	0,91	1,045	1,095	1,136	1,14	1,139	1,032	1,046	
676	0,971	0,953	1,062	0,9	1,035	1,092	1,12	1,165	1,148	0,962	1,041	
677	0,913	0,906	0,989	0,886	0,973	1,069	1,067	1,046	1,113	0,983	0,995	
678	0,966	0,954	1,026	0,978	1,05	1,147	1,137	1,124	1,186	1,076	1,064	
679	1,02	0,995	1,075	1,035	1,112	1,199	1,195	1,204	1,223	1,147	1,121	
680	0,969	0,956	1,045	0,977	1,049	1,138	1,136	1,124	1,139	1,11	1,064	
												1,054
<b>N</b>	770	1,052	1,054	1,007	1,018	1,017	1,169	1,175	1,021	1,179	1,091	1,078
	771	0,938	1,019	1,05	1,043	1,058	1,107	1,137	1,096	1,138	1,083	1,067
	772	0,969	1,035	1,036	1,046	1,098	1,125	1,147	1,191	1,166	1,121	1,093
	773	0,955	0,992	1,024	0,992	1,056	1,134	1,129	1,13	1,172	1,063	1,065
	774	0,932	0,93	1,016	0,958	1,012	1,12	1,1	1,037	1,157	0,996	1,026
	775	0,998	0,92	0,993	1,012	1,062	1,107	1,104	1,085	1,152	1,047	1,048
	776	0,986	0,942	0,982	0,974	1,056	1,126	1,135	1,046	1,078	1,101	1,043
	777	0,93	0,931	1,022	0,892	1,033	1,124	1,139	1,052	0,989	1,12	1,023
	778	0,904	0,898	1,064	0,863	1,029	1,096	1,12	1,123	0,983	1,096	1,018
	779	0,974	0,902	1,01	0,982	1,058	1,073	1,112	1,192	1,147	1,038	1,049
	780	0,945	0,963	0,925	0,945	1,014	1,098	1,092	1,128	1,111	1,007	1,023
	781	0,948	0,959	0,934	0,914	1,002	1,122	1,139	1,052	0,986	1,002	1,015
	782	1,015	0,932	1,035	0,949	1,051	1,141	1,088	1,165	1,145	1,027	1,055
	783	1,034	1,094	1,088	0,98	1,101	1,18	1,141	1,217	1,176	1,102	1,111
	784	1,057	1,065	1,085	1,064	1,142	1,2	1,242	1,179	1,26	1,067	1,136
	785	0,981	0,928	1,014	1,023	1,07	1,139	1,147	1,076	1,183	0,97	1,053
	786	0,874	0,87	0,956	0,913	0,963	1,039	0,973	1,028	1,013	0,935	0,959
	787	0,987	1,051	1,076	1,054	1,072	1,132	1,225	1,21	1,123	1,112	1,104
	788	0,939	0,996	1,064	1,024	1,056	1,084	1,174	1,12	1,139	1,088	1,068
	789	0,865	0,888	0,944	0,898	0,958	1	1,013	0,971	1,045	0,998	0,958
790	0,878	0,89	0,829	0,816	0,881	0,988	0,977	0,953	0,939	0,994	0,915	
791	0,876	0,882	0,871	0,85	0,901	1,131	1,033	1,026	0,952	1,032	0,955	
792	0,858	0,864	0,945	0,879	0,944	1,101	1,023	0,994	0,974	1,003	0,959	
793	0,884	0,872	0,995	0,887	0,995	1,021	1,021	0,981	1,043	0,993	0,969	
794	0,984	0,931	1,015	0,902	1,055	1,072	1,119	1,115	1,192	1,085	1,047	
795	0,984	0,999	1,033	0,955	1,077	1,182	1,202	1,153	1,205	1,112	1,090	
796	0,96	0,939	0,998	1,015	1,084	1,169	1,172	1,1	1,164	1,112	1,071	
797	0,925	0,856	0,954	1,013	1,051	0,996	1,094	1,061	1,126	1,084	1,026	
798	0,882	0,894	0,961	0,931	0,968	1,088	1,07	1,11	1,117	1,032	1,005	
799	0,925	0,983	1,059	0,969	0,98	1,107	1,12	1,073	1,136	1,012	1,036	
800	1,006	1,026	1,101	1,038	1,006	1,125	1,137	1,05	1,17	1,063	1,072	
801	1,006	0,969	1,049	1,042	1,01	1,114	1,108	1,039	1,125	1,098	1,056	
802	0,855	0,832	0,962	0,942	0,995	1,072	1,083	0,998	0,939	1,004	0,968	
803	0,887	0,814	0,94	0,916	0,98	1,061	1,077	1,052	0,97	0,968	0,967	
804	0,922	0,843	0,895	0,865	0,956	1,051	1,053	1,04	1,028	0,963	0,962	
805	0,922	0,902	0,866	0,844	0,955	1,047	1,061	0,986	1,051	0,967	0,960	
806	0,97	1,034	0,979	1,009	1,037	1,085	1,2	1,038	1,109	0,985	1,045	
807	1,046	1,043	1,093	1,063	1,158	1,168	1,176	1,045	1,177	1,099	1,107	
808	0,989	0,917	0,963	0,926	1,052	1,081	1,052	1,002	1,08	1,051	1,011	
809	0,881	0,824	0,803	0,794	0,89	0,958	0,995	0,99	0,961	0,934	0,903	
810	0,889	0,9	0,974	0,855	1,012	1,085	1,083	1,086	1,082	1,029	1,000	
												1,027

<b>NDVI</b>
-0,013

Figura 32, Cálculo NDVI de los datos del sensor FieldSpec 4

### 3.3.1.6 Verificación y análisis de datos

Para la verificación del NDVI que se obtuvo a partir de cada uno de los sensores se comprobó que inicialmente se encuentran entre valores de -1 a 1, lo que permite detectar posibles inconsistencias en el proceso de captura de datos. Seguidamente, se generó el reporte de validación de los sensores espectrales con el que se pudieron verificar los resultados obtenidos mediante correspondencia y una rápida discusión de los resultados obtenidos.

### 3.3.2 Análisis de datos en campo

#### 3.3.2.1 Modelo de muestreo

La ortofoto y los límites obtenidos en la fase previa se utilizaron para realizar un modelo de muestreo a criterio experto. De esta forma se determina que las muestras se encuentren a una distancia aproximada de diez metros entre sí. Con esta información se dividió la parcela en zonas homogéneas, mediante la visualización de cambios de pigmentación.

Con la ayuda de las librerías *sp* y *maptools* del software R y con la herramienta *readShapePoly* se cargaron los archivos *.shp* de cada zona. Dentro de cada zona se calcularon las coordenadas de los puntos a muestrear, utilizando la herramienta *spsample*, en la cual se especifica la zona en la que se desea trabajar, el número aproximado de puntos que se quieren introducir y la distribución que se plantea para los puntos (ver Figura 33). Se escogió una distribución de grilla hexagonal, debido a la ayuda que presta a la hora de la navegación en el terreno (ver Figura 34). Estas coordenadas se las exportó en un archivo con formato *.csv* (ver Tabla 6).

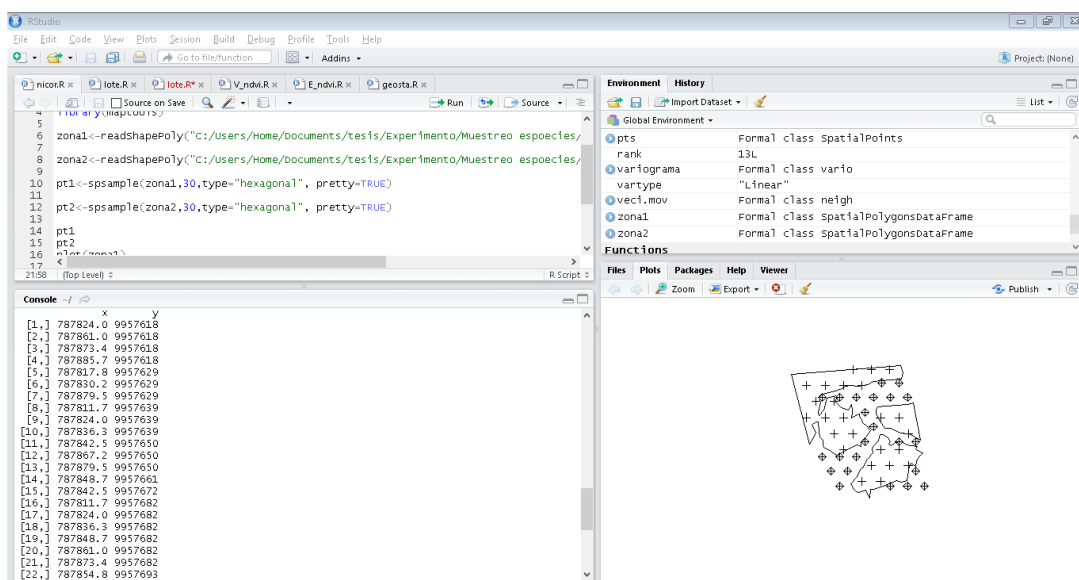


Figura 33, Software R

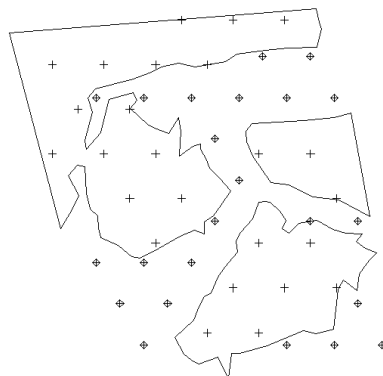


Figura 34, Distribución de puntos en software R

Tabla 6

Resumen del reporte de Coordenadas

Número	Código	Zona	Subzona	Punto	X	Y
1	E1_1	E	1	1	787856.18	9957530.62
2	E1_2	E	1	2	787864.03	9957530.62
92	E3_28	E	3	28	787839.20	9957566.17
93	E3_29	E	3	29	787846.72	9957566.17
94	V1_1	V	1	1	787840.45	9957621.27
95	V1_2	V	1	2	787853.83	9957621.27
121	V2_3	V	2	3	787873.36	9957618.09
122	V2_4	V	2	4	787885.69	9957618.09
139	V2_21	V	2	21	787873.36	9957682.2
140	V2_22	V	2	22	787854.85	9957692.88
141	V2_23	V	2	23	787867.19	9957692.88

### 3.3.2.2 Replanteo RTK y captura de información

El reporte codificado en formato .csv, fue introducido en la colectora Trimble TSC3 para realizar el replanteo RTK con la ayuda del equipo GPS Trimble R8. Con el reporte cargado en la colectora y con el componente móvil del GPS, se procedió a la navegación y búsqueda de cada uno de los puntos del reporte mediante RTK.





*Figura 35, Puntos en Colectora*

A la par de este proceso se capturó la información con el sensor FieldSpec4 para cada uno de los puntos previamente cargados. Para ello se realizó la medición a 87,5 cm. sobre el pasto con un ángulo de 90 grados sobre el suelo y un FOV de 8 grados. Utilizando la ecuación (E. 23) se obtuvo un tamaño de pixel de 12,515 cm como se calculó en la Tabla 5. Se registró cada uno de los puntos en hojas de campo.



*Figura 36, Captura de información y replanteo*

### 3.3.2.3 Cálculo de NDVI para cada punto

Se implementó un script en lenguaje R para calcular el NDVI de cada punto. Dicho script importa desde un archivo *.txt*, con el formato que se especifica en la Figura 8, las direcciones de cada uno de los puntos con sus respectivos datos crudos recolectados en campo. Al entrar a esta dirección el programa carga los datos crudos y selecciona los datos de las bandas roja (640-680) e infrarroja (770-810), promedia todas las mediciones de cada banda y crea una pseudobanda con las que se calcula el NDVI, aplicando la ecuación (E.1). Cada valor calculado se guardó en una matriz para luego exportarla con todos los datos en.csv, como se indica en la Figura 37.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	No	E	N	Cod	Dir							
2	94	787840.448	9957621.27	V1_1	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_1.txt							
3	95	787853.83	9957621.27	V1_2	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_2.txt							
4	96	787847.139	9957632.86	V1_3	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_3.txt							
5	97	787860.522	9957632.86	V1_4	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_4.txt							
6	98	787873.904	9957632.86	V1_5	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_5.txt							
7	99	787827.066	9957644.45	V1_6	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_6.txt							
8	100	787853.83	9957644.45	V1_7	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_7.txt							
9	101	787867.213	9957644.45	V1_8	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_8.txt							
10	102	787820.374	9957656.04	V1_9	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_9.txt							
11	103	787833.757	9957656.04	V1_10	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_10.txt							
12	104	787873.904	9957656.04	V1_11	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_11.txt							
13	106	787813.683	9957667.63	V1_13	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_13.txt							
14	107	787827.066	9957667.63	V1_14	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_14.txt							
15	108	787853.83	9957667.63	V1_15	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_15.txt							
16	109	787867.213	9957667.63	V1_16	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_16.txt							
17	110	787806.992	9957679.22	V1_17	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_17.txt							
18	111	787820.374	9957679.22	V1_18	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_18.txt							
19	112	787800.301	9957690.81	V1_19	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_19.txt							
20	113	787813.683	9957690.81	V1_20	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_20.txt							
21	114	787827.066	9957690.81	V1_21	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_21.txt							
22	115	787840.448	9957690.81	V1_22	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_22.txt							
23	116	787833.757	9957702.4	V1_23	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_23.txt							
24	117	787847.139	9957702.4	V1_24	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_24.txt							
25	118	787860.522	9957702.4	V1_25	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V1_25.txt							
26	119	787824.007	9957618.09	V2_1	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V2_1.txt							
27	120	787861.018	9957618.09	V2_2	C:/Users/Home/Documents/tesis/Tesis/1. Espectro/2. IASA/2. Reflectancia_txt/TXT_V/V2_2.txt							

Figura 37, Tabla ingresada en R

Tabla 7

NDVI de puntos muestreados con el sensor FieldSpec4

No	E	N	Cod	NDVI
1	787856.184	9957530.62	E1_1	0.94925296
2	787864.025	9957530.62	E1_2	0.91008743
3	787860.105	9957537.41	E1_3	0.93004301
4	787867.946	9957537.41	E1_4	0.91455736
5	787864.025	9957544.2	E1_5	0.90592534
6	787864.025	9957557.79	E1_6	0.93503998

Continua 



<b>7</b>	<b>787871.867</b>	<b>9957557.79</b>	<b>E1_7</b>	<b>0.94237081</b>
<b>8</b>	787879.708	9957557.79	E1_8	0.94688865
<b>9</b>	787875.788	9957564.58	E1_9	0.92512671
<b>10</b>	787883.629	9957564.58	E1_10	0.93784576

### 3.4 Muestreo en campo y modelo geoestadístico (Fase 3)

#### 3.4.1 Generar modelo geoestadístico, Modelo NDVI (2)

Para realizar el modelo geoestadístico se utilizó el software R (Figura 38) con sus librerías *RGeostats*, *Rcmdr* y *sp*. Primero se cargó la base de datos creada en el paso anterior. De esta base se seleccionaron 30 puntos aleatoriamente para ser eliminados de la base de datos principal a fin de ser utilizados en la posterior validación del modelo.

A continuación, se procedió a realizar el análisis exploratorio de datos, que consiste en determinar la estadística descriptiva de los puntos muestreados (media, desviación estándar, rango, coeficiente de variación, asimetría, cuartiles, kurtosis). Seguidamente se revisó la existencia de una tendencia mediante los gráficos de dispersión (NDVI vs. Coordenada Este y Norte) y mediante el diagrama de caja se pudo analizar la presencia de valores atípicos en la muestra.

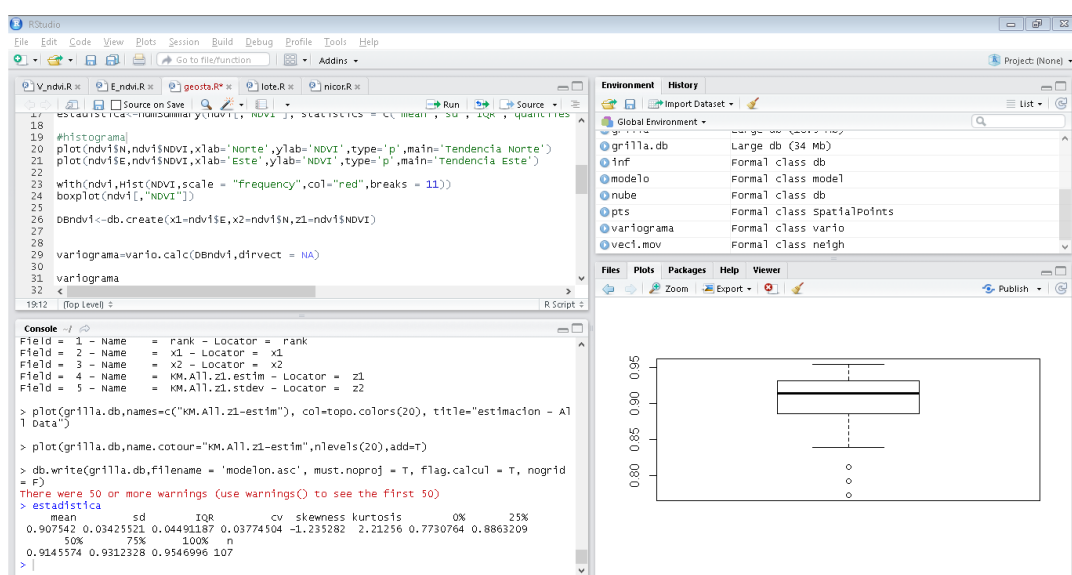


Figura 38, Software R

En el proceso geoestadístico lo primero que se realizó fue el variograma. Para ello se creó una base de datos RGeostats, donde se almacenaron únicamente las coordenadas y su valor de NDVI. Luego se procedió a realizar la nube variográfica y graficar la misma para su análisis.

A continuación, se calculó y graficó el variograma con la herramienta *model.auto*. Esta función, de manera general, minimiza una función de costo, que se define como la diferencia en todos los puntos entre el variograma experimental y el modelo de ajuste. Esta función se la minimiza a través del algoritmo de Gauss-Newton. Finalmente, se reduce el modelo aplicando el principio de parsimonia.

El resultado que se obtiene es la estructura básica o una combinación lineal de estructuras básicas (modelos anidados) que mejor se ajustan al variograma experimental (Dessasis & Renard, 2013). Se escogieron los modelos teóricos que se pueden ajustar al variograma. En este caso se escogieron 7, de los 17 modelos disponibles en RGeostats. Se realizó una validación cruzada y se crearon vecindades móviles.

Finalmente se creó una grilla o *grid*, con el mismo tamaño de píxel con el que cuenta la imagen obtenida con el dron. Con la grilla creada se procedió a realizar el Krigado y a calcular los valores para cada uno de los nodos de la cuadrícula previamente creada. Para ello se utilizó la base de datos, el modelo teórico y las vecindades móviles. El resultado se lo exportó en un archivo ASCII, para luego ser transformado en ráster en software QGIS, el cual es el modelo final para los posteriores análisis.

### **3.5 Análisis y comparación de datos (Fase 4)**

Esta fase permitió finalmente evaluar los productos generados en la Fase 1 y 3, es decir los modelos de NDVI (1) y (2) respectivamente. Para comparar los resultados obtenidos fue necesario generar los subproductos que se detallan a continuación:

### 3.5.1 Evaluación de los modelos con puntos de validación

Para esta evaluación realizada en el software QGIS, se contrastaron los modelos 1 y 2 con un *shape* de 30 puntos con información de NDVI obtenida en la fase 2 de la presente metodología. A este fichero *shape* de puntos se le añadió un campo con el valor exacto del pixel donde se ubicaba el punto dentro de cada modelo. Con los valores de NDVI observados y extraídos, se añadió un campo adicional que contiene las diferencias entre valores de NDVI de cada modelo vs el valor de NDVI de los puntos de validación. Para determinar qué modelo de NDVI se ajusta mejor a los puntos de validación, se realizaron los cálculos de error medio y error medio cuadrático, utilizando las ecuaciones E. 21 y E. 22.

### 3.5.2 Comparación entre modelos de NDVI

Se aplicó un análisis de correlación por el método de Pearson (E. 24), que proporcionó la medida de intensidad de la relación lineal entre los dos modelos. Al medir el grado en que se encuentran correlacionados los modelos, se podrá observar la relación que tienen entre sí los modelos. Esto se logra mediante el cálculo estadístico de correlación lineal de Pearson. Además de eso se podrá comprobar la bondad del ajuste a partir del cálculo del coeficiente de determinación  $R^2$ .

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad E. 24$$

Donde:

- $\sigma_{XY}$  es la covarianza de (X,Y)
- $\sigma_X$  es la desviación típica de la variable X
- $\sigma_Y$  es la desviación típica de la variable Y

La interpretación de los análisis de correlación se obtienen del estudio de Díaz (2015), que define los rangos cualitativos para el análisis de correlación de Pearson definido entre valores de [-1;1] (Tabla 8)

Tabla 8

*Tipos de Correlación en función del valor  $\sigma$*

Tipo de Correlación	$\sigma$
Correlación positiva o directa perfecta.	1
Correlación positiva	$> 0$
Correlación débil	Próxima a 0
Correlación negativa.	$< 0$
Correlación negativa o indirecta perfecta	-1

Fuente: modificada de (Díaz, 2015)

De la misma forma se puede definir el coeficiente de determinación  $R^2$ , que es un coeficiente estadístico que sirve para medir la bondad del ajuste del modelo de regresión. Este coeficiente se expresa en tanto por 1. Para este cálculo solamente se tiene que elevar al cuadrado el coeficiente de correlación de Pearson lo que permite obtener un valor de  $R^2$ , el cual se puede interpretar cualitativamente, según la Tabla 9 definida por Díaz en (2015).

Tabla 9

*Bondad del ajuste en función del valor  $\sigma^2$*

Bondad del ajuste	$\sigma^2$
Correlación positiva o directa perfecta	$> 0,85$
Correlación positiva	0,5 – 0,85
Correlación débil	0,4 – 0,5
Correlación negativa	0,3 – 0,4
Muy malo	$< 0,3$

Fuente: modificada de (Díaz, 2015)

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Modelo NDVI obtenido por UAV

Durante el proceso de generación del modelo de NDVI “modelo 1”, se obtuvieron además subproductos que respaldan la calidad de la información obtenida.

##### 4.1.1 Puntos de control fotogramétrico GCP

Como base se rastreó un punto el 24 de septiembre del 2016, correspondiente al DOY 268, semana GPS 1915. Para realizar el procesamiento de los puntos se utilizó la estación EPEC perteneciente a la infraestructura de monitoreo continuo del Ecuador (REGME) obteniendo como resultado el siguiente punto, con las precisiones especificadas en la Tabla 10.

Tabla 10

Coordenadas de la base utilizada para posicionamiento de los GCP.

A:		GPS-01					
Cuadrícula		Local			Global		
Este	787580,476 m	Latitud	S0°23'02,76306"	Latitud	S0°23'02,76306"		
Norte	9957501,821 m	Longitud	W78°24'59,07957"	Longitud	W78°24'59,07957"		
Elevación	2740,279 m	Altura	2740,279 m	Altura	2740,279 m		

Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (Metro)	Prec. V. (Metro)	Aci. geod.	Dist. elip (Metro)	ΔAltura (Metro)
EPEC --- GPS-01 (B1)	EPEC	GPS-01	Fija	0,006	0,016	156°29'13"	8345,868	217,298

Partiendo de este punto base se ubicaron cinco puntos de control, en modo RTK, con precisiones menores a  $\pm 4,3$  cm.

#### 4.1.2 Ortofotomosaicos

##### 4.1.2.1 Ortofotomosaico RGB

El ortofotomosaico en color verdadero fue generado con las imágenes obtenidas a partir del vuelo realizado con el UAV, utilizando el cañón *RGB* del sensor multiespectral Parrot Sequoia se obtiene la ortofoto, esta fue utilizada como insumo en la Fase 3 del presente estudio.



*Figura 39, Ortofoto RGB obtenida mediante UAV*

##### 4.1.2.2 Ortofotomosaicos Multiespectrales

Durante el proyecto se generaron 4 ortofotomosaicos para cada banda espectral del sensor los cuales se pueden ver en la Figura 40, estos ya con una corrección radiométrica, presentan la reflectancia del área de estudio en cada una de dichas bandas espectrales.

Este mosaico, tiene en cuenta una serie de factores que cambian en cada toma, tales como:

- Nubes
- Hora de la captura
- Altitud
- Atmósfera e iluminación

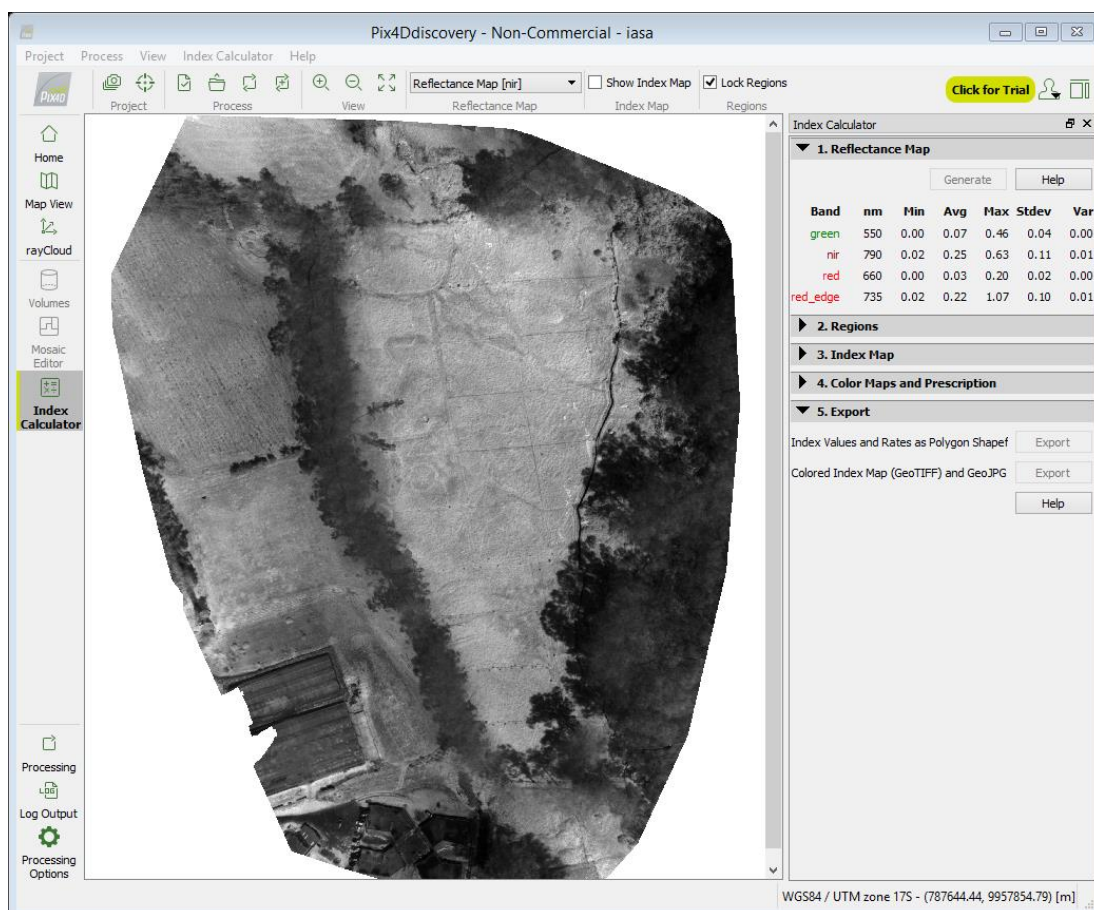


Figura 40, Ortomosaico NIR visualizado en Pix4D discovery

El software indica la longitud de onda de los centros de cada banda, así como su valor de reflectancia mínimo y máximo, la media, desviación estándar y cada varianza. Los valores a tener en cuenta en el estudio son los de la banda *NIR* y los de la banda *RED* (Figura 41) que son los que se utilizaron para calcular el valor de NDVI.

Band	nm	Min	Avg	Max	Stdev	Var
green	550	0.00	0.07	0.46	0.04	0.00
nir	790	0.02	0.25	0.63	0.11	0.01
red	660	0.00	0.03	0.20	0.02	0.00
red_edge	735	0.02	0.22	1.07	0.10	0.01

Figura 41, Estadísticas del procesamiento de los mosaicos de reflectancia

Estos mosaicos multiespectrales tienen una resolución espacial de 12,5 cm, y un RSM en el ajuste geométrico de a 0,066 m (Figura 42).

#### Quality Check i

Images	median of 10000 keypoints per image	✓
Dataset	360 out of 360 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	0.02% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 4495.53 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.066 m	✓

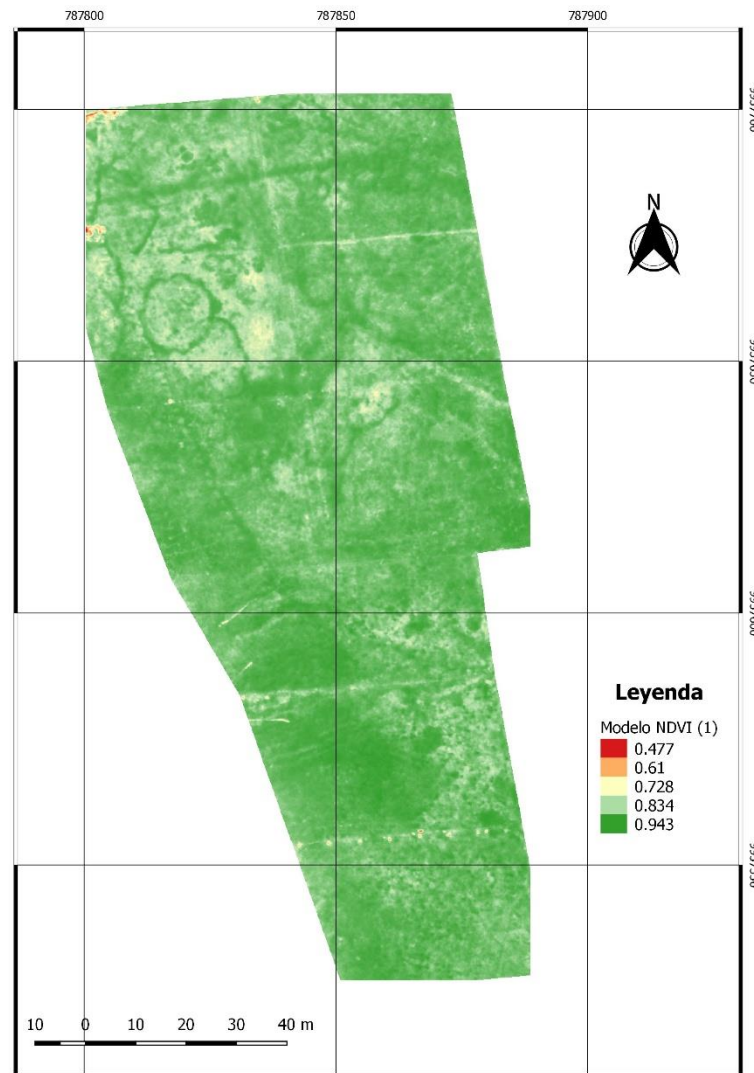
Figura 42, Control de calidad, extraído del reporte de calidad del procesamiento

Fuente: (Pix4D, 2017)

#### 4.1.3 Modelo NDVI (1)

Finalmente, a partir de estos mosaicos de reflectancia, y mediante la combinación de sus bandas, se generó el índice de vegetación deseado. Esto se llevó a cabo en el software Pix4D Ag. Este modelo de NDVI (1) conserva las características de sus ráster de entrada originales (mosaicos de reflectancia NIR, RED). Aplicando la máscara para la zona de estudio se obtuvo el siguiente modelo (Figura 43)





*Figura 43, Modelo de NDVI (1)*

## 4.2 Comparación entre valores de NDVI de los sensores espectrales

### 4.2.1 Validación en laboratorio

A partir de los datos obtenidos en laboratorio durante la Fase 1, se obtuvieron las diferencias entre los valores muestrales, para cada una de las seis muestras obtenidas. (Tabla 11)

*Tabla 11*

*Diferencias de NDVI obtenido con los dos sensores.*

<b>Imagen</b>	<b>Código</b>	<b>NDVI Parrot</b>	<b>NDVI FieldSpec 4</b>	<b>Diferencia</b>
1318	Hoja	0,6713	0,8540	0,1827
1220	Planta	0,6268	0,6367	0,0100
1127	Pasto	0,6897	0,8785	0,1889
720	Calibración	0,0000	0,0010	0,0010
1525	Target Parrot	0,0922	0,0938	0,0016
1614	Negro	0,0085	0,0102	0,0017

Finalmente se elaboró un reporte de validación del sensor multiespectral Parrot Sequoia, obtenido en el laboratorio del área de investigaciones espaciales del Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), donde se reportan inconsistencias encontradas en este proceso y recomendaciones para los procesos de captura de datos en la presente investigación

#### *4.2.2 Validación en campo*

##### *4.2.2.1 Coordenadas de puntos de muestreo*

Se obtuvieron 2 zonas, la primera (Zona E) se dividió en 3 subzonas y la segunda (Zona V) en 2 subzonas, mediante visualización de zonas homogéneas. Dentro de estas zonas se distribuyeron los puntos a ser muestreados de manera hexagonal. Las coordenadas obtenidas con el modelo de muestreo fueron exportadas en un archivo .csv. El reporte constó de un total de 141 puntos. Con el fin de facilitar el procesamiento de la información y la navegación en el terreno, se codificaron los puntos de acuerdo a su ubicación dentro de cada zona y subzona, como se muestra a continuación gráficamente en la Figura 44 y numéricamente en la Tabla 12.

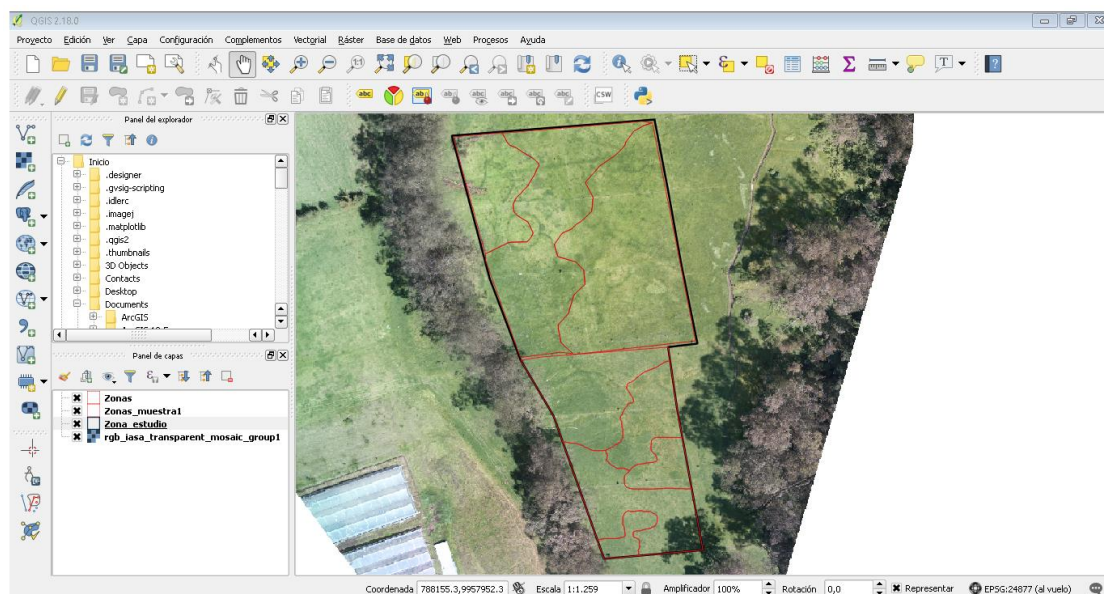


Figura 44, Zonificación en QGIS

Tabla 12

Coordenadas de los puntos de muestreo

No	Este	Norte	Cod	No	Este	Norte	Cod
1	787856.18	9957530.62	E1_1	72	787888.06	9957533.62	E3_8
2	787864.03	9957530.62	E1_2	73	787846.72	9957540.13	E3_9
3	787860.10	9957537.41	E1_3	74	787854.24	9957540.13	E3_10
4	787867.95	9957537.41	E1_4	75	787876.79	9957540.13	E3_11
5	787864.03	9957544.20	E1_5	76	787884.31	9957540.13	E3_12
6	787864.03	9957557.79	E1_6	77	787850.48	9957546.64	E3_13
7	787871.87	9957557.79	E1_7	78	787858.00	9957546.64	E3_14
8	787879.71	9957557.79	E1_8	79	787865.51	9957546.64	E3_15
9	787875.79	9957564.58	E1_9	80	787873.03	9957546.64	E3_16
10	787883.63	9957564.58	E1_10	81	787880.55	9957546.64	E3_17
11	787848.34	9957571.37	E1_11	82	787888.06	9957546.64	E3_18
12	787871.87	9957571.37	E1_12	83	787846.72	9957553.15	E3_19
13	787879.71	9957571.37	E1_13	84	787854.24	9957553.15	E3_20
14	787836.58	9957578.16	E1_14	85	787861.75	9957553.15	E3_21
15	787844.42	9957578.16	E1_15	86	787869.27	9957553.15	E3_22
16	787852.26	9957578.16	E1_16	87	787876.79	9957553.15	E3_23

Continua 

17	787832.66	9957584.95	E1_17	88	787884.31	9957553.15	E3_24
18	787840.50	9957584.95	E1_18	89	787842.96	9957559.66	E3_25
19	787848.34	9957584.95	E1_19	90	787850.48	9957559.66	E3_26
20	787856.18	9957584.95	E1_20	91	787858.00	9957559.66	E3_27
21	787828.74	9957591.74	E1_21	92	787839.20	9957566.17	E3_28
22	787836.58	9957591.74	E1_22	93	787846.72	9957566.17	E3_29
23	787844.42	9957591.74	E1_23	94	787840.45	9957621.27	V1_1
24	787852.26	9957591.74	E1_24	95	787853.83	9957621.27	V1_2
25	787860.10	9957591.74	E1_25	96	787847.14	9957632.86	V1_3
26	787824.82	9957598.53	E1_26	97	787860.52	9957632.86	V1_4
27	787832.66	9957598.53	E1_27	98	787873.90	9957632.86	V1_5
28	787840.50	9957598.53	E1_28	99	787827.07	9957644.45	V1_6
29	787848.34	9957598.53	E1_29	100	787853.83	9957644.45	V1_7
30	787856.18	9957598.53	E1_30	101	787867.21	9957644.45	V1_8
31	787864.03	9957598.53	E1_31	102	787820.37	9957656.04	V1_9
32	787828.74	9957605.32	E1_32	103	787833.76	9957656.04	V1_10
33	787836.58	9957605.32	E1_33	104	787873.90	9957656.04	V1_11
34	787844.42	9957605.32	E1_34	105	787800.30	9957667.63	V1_12
35	787852.26	9957605.32	E1_35	106	787813.68	9957667.63	V1_13
36	787860.10	9957605.32	E1_36	107	787827.07	9957667.63	V1_14
37	787867.95	9957605.32	E1_37	108	787853.83	9957667.63	V1_15
38	787875.79	9957605.32	E1_38	109	787867.21	9957667.63	V1_16
39	787856.14	9957567.31	E2_1	110	787806.99	9957679.22	V1_17
40	787861.98	9957567.31	E2_2	111	787820.37	9957679.22	V1_18
41	787867.83	9957567.31	E2_3	112	787800.30	9957690.81	V1_19
42	787859.06	9957572.38	E2_4	113	787813.68	9957690.81	V1_20
43	787864.91	9957572.38	E2_5	114	787827.07	9957690.81	V1_21
44	787870.76	9957572.38	E2_6	115	787840.45	9957690.81	V1_22
45	787861.98	9957577.44	E2_7	116	787833.76	9957702.40	V1_23
46	787867.83	9957577.44	E2_8	117	787847.14	9957702.40	V1_24
47	787873.68	9957577.44	E2_9	118	787860.52	9957702.40	V1_25
48	787879.53	9957577.44	E2_10	119	787824.01	9957618.09	V2_1
49	787859.06	9957582.51	E2_11	120	787861.02	9957618.09	V2_2
50	787864.91	9957582.51	E2_12	121	787873.35	9957618.09	V2_3
51	787870.76	9957582.51	E2_13	122	787885.69	9957618.09	V2_4
52	787876.61	9957582.51	E2_14	123	787817.84	9957628.77	V2_5
53	787882.46	9957582.51	E2_15	124	787830.18	9957628.77	V2_6
54	787861.98	9957587.58	E2_16	125	787879.52	9957628.77	V2_7

Continua 

55	787867.83	9957587.58	E2_17	126	787811.67	9957639.46	V2_8
56	787873.68	9957587.58	E2_18	127	787824.01	9957639.46	V2_9
57	787879.53	9957587.58	E2_19	128	787836.34	9957639.46	V2_10
58	787864.91	9957592.64	E2_20	129	787842.51	9957650.14	V2_11
59	787870.76	9957592.64	E2_21	130	787867.19	9957650.14	V2_12
60	787876.61	9957592.64	E2_22	131	787879.52	9957650.14	V2_13
61	787867.83	9957597.71	E2_23	132	787848.68	9957660.83	V2_14
62	787873.68	9957597.71	E2_24	133	787842.51	9957671.51	V2_15
63	787879.53	9957597.71	E2_25	134	787811.67	9957682.20	V2_16
64	787876.61	9957602.77	E2_26	135	787824.01	9957682.20	V2_17
65	787869.27	9957527.11	E3_1	136	787836.34	9957682.20	V2_18
66	787876.79	9957527.11	E3_2	137	787848.68	9957682.20	V2_19
67	787850.48	9957533.62	E3_3	138	787861.02	9957682.20	V2_20
68	787858.00	9957533.62	E3_4	139	787873.35	9957682.20	V2_21
69	787865.51	9957533.62	E3_5	140	787854.85	9957692.88	V2_22
70	787873.03	9957533.62	E3_6	141	787867.19	9957692.88	V2_23
71	787880.55	9957533.62	E3_7				

#### 4.2.2.2 Captura de datos y procesamiento inicial

Con el reporte anterior se realizó el replanteo RTK y la captura de los datos con el espectrorradiómetro. Los datos crudos se registraron, en formato *.asd*. Estos archivos poseen un valor de reflectancia para cada longitud de onda, de 350 nm a 2500 nm. Cada punto posee 10 de estos archivos, uno por cada observación. Utilizando el software *ViewSpecPro* se procesaron estos datos para generar un archivo *.txt* para cada uno de los puntos de muestreo, en el cual ya se encuentran todas las mediciones de cada punto.






Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
 e1_1700000.asd	26/01/2017 11:18	Archivo ASD	35 KB
 e1_1700001.asd	26/01/2017 11:18	Archivo ASD	35 KB
 e1_1700002.asd	26/01/2017 11:18	Archivo ASD	35 KB
 e1_1700003.asd	26/01/2017 11:18	Archivo ASD	35 KB
 e1_1700004.asd	26/01/2017 11:18	Archivo ASD	35 KB
 e1_1700005.asd	26/01/2017 11:18	Archivo ASD	35 KB
 e1_1700006.asd	26/01/2017 11:18	Archivo ASD	35 KB
 e1_1700007.asd	26/01/2017 11:18	Archivo ASD	35 KB
 e1_1700008.asd	26/01/2017 11:18	Archivo ASD	35 KB
 e1_1700009.asd	26/01/2017 11:18	Archivo ASD	35 KB

Figura 45, Ejemplo de datos crudos de un punto

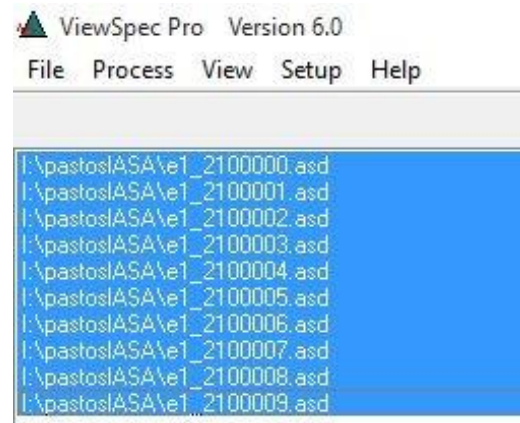


Figura 46, Archivos .asd en ViewSpec Pro

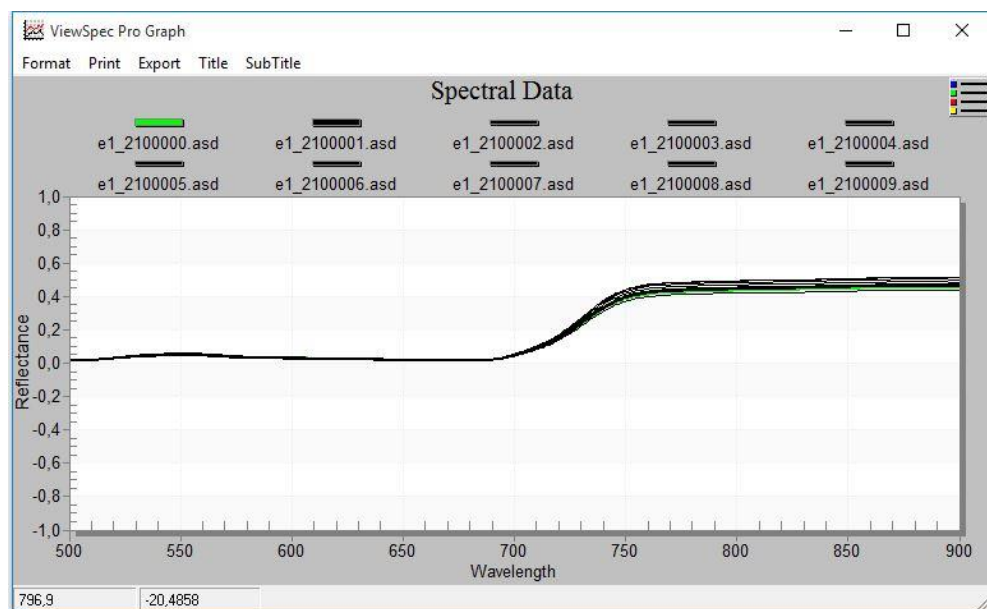


Figura 47, Curva espectral del punto E1\_21

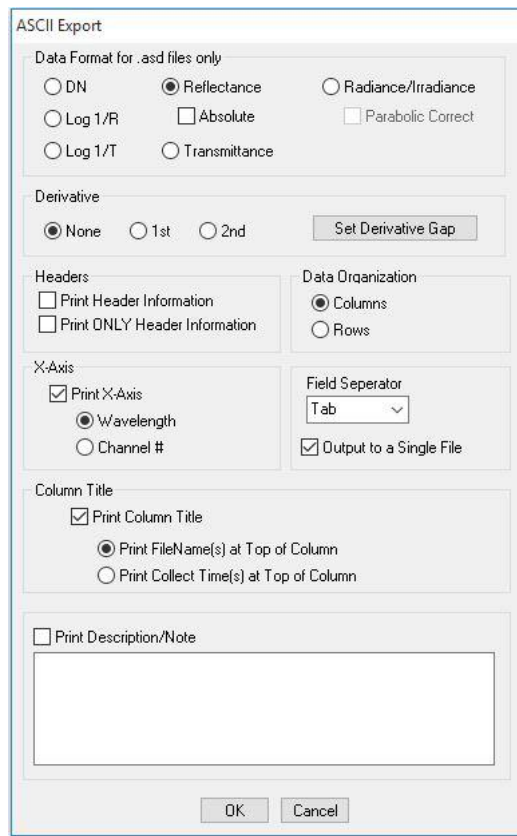


Figura 48, Exportado de datos crudos en .txt

WaveLength	e_1_100010.asd	e_1_100011.asd	e_1_100012.asd	e_1_100013.asd	e_1_100014.asd	e_1_100015.asd	e_1_100016.asd	e_1_100017.asd	e_1_100018.asd	e_1_100019.asd
350	9.4925133342388E-03	9.79421233279733E-03	6.27870663407404E-03	8.44262036989512E-03	1.08722138946611E-02	6.06478763989808E-03	7.7428197283819			
351	6.09823282869558E-03	7.55605001703452E-03	7.72585991101828E-03	7.6320689537489E-03	5.96204637110797E-03	6.09479701545019E-03	7.0302609801458			
352	7.49800499882167E-03	6.18046360832778E-03	9.84023166722391E-03	6.71894165835865E-03	6.36815381268511E-03	5.5602425671357E-03	8.0561609996589			
353	1.03008098600186E-02	7.13293260032394E-03	1.07783005042618E-02	6.98431586708536E-03	8.75882544329871E-03	6.74557459155295E-03	7.2732613074780			
354	1.01408529737908E-02	9.20466812394181E-03	9.32332123839599E-03	8.2796628545117E-03	7.59117729098167E-03	9.63804502304701E-03	3.2155866981047			
355	8.77854500139244E-03	7.30157465756248E-03	5.53565275177409E-03	6.33347283808329E-03	3.90331871015266E-03	4.25704853329029E-03	5.40414378663429			
356	6.32345109018867E-03	5.6035266626202E-03	5.25036331732621E-03	5.1993599042687E-03	3.76681287722999E-03	4.11511654113729E-03	5.9237085685340			
357	4.6236244802363E-03	5.39449552555767E-03	6.62161116148981E-03	5.98659350701196E-03	6.08845118313075E-03	6.15500662138697E-03	5.3293561500273			
358	5.62711308970781E-03	6.30975853884777E-03	5.48348727019487E-03	6.50716569473197E-03	6.93721268154538E-03	3.13681541016511E-03	6.6927878208953			
359	8.30848620657334E-03	7.05354301805505E-03	4.65426431705647E-03	9.17528574506913E-03	6.1154525449717E-03	6.49750258676149E-03	5.77249180874590			
360	1.0773650259397E-02	6.33980882213373E-03	4.86300391132328E-03	1.02362586972585E-02	5.69499130634302E-03	7.05603228111383E-03	6.8089403361636			
361	1.17364185906131E-02	5.2615937270071E-03	6.21919049826283E-03	8.89474851302991E-03	5.42129438443322E-03	4.38948532046209E-03	8.4637280313919			
362	0.0109599228561	6.39527242513788E-03	8.21191817084008E-03	7.12359676208902E-03	3.53797385775983E-03	5.1394629952083E-03	5.75570180079655			
363	7.05742305325983E-03	6.47320760997241E-03	8.11838997026617E-03	7.29911409935365E-03	4.50573090815279E-03	4.006070052471254E-03	7.631970191376304			
364	6.09025270546967E-03	6.2048683489579E-03	6.96579229186888E-03	7.16038065797046E-03	5.71062484459197E-03	4.81406510424896E-03	8.8279252495990			
365	7.06257992096363E-03	6.47789650757197E-03	5.75341307842401E-03	6.29487085935341E-03	5.4918886477523E-03	7.81939827637082E-03	6.52259766510			
366	6.31514406219156E-03	8.22592679092325E-03	4.39254051809904E-03	8.02370395950916E-03	4.94363200821623E-03	6.47569785250172E-03	4.0288574932799			
367	7.31504295344148E-03	6.03688759403207E-03	5.65234077589631E-03	7.65440649477197E-03	4.96877255946209E-03	5.9260181330067E-03	5.2313181990278			
368	8.4111688303547E-03	4.61393748488215E-03	7.68070860822457E-03	6.10451655164246E-03	4.54315688026117E-03	5.9870681873078E-03	6.6722536521597			
369	7.8409399653064E-03	7.5672066978948E-03	8.04802543825942E-03	5.31652483675315E-03	3.36785516088329E-03	5.83782868577065E-03	5.3009181211711			
370	6.88189805337846E-03	6.80429218332671E-03	6.188990160475746E-03	5.74515313363995E-03	0.006251051458134	7.054102070709109E-03	5.7473120103168			
371	6.09645068289046E-03	6.0074706245696E-03	6.18706951648095E-03	6.05459930580155E-03	5.82285818221766E-03	7.70357161258727E-03	5.720947915123			
372	5.9198991642974E-03	6.97060738633713E-03	7.1022923415957E-03	5.3880222066502E-03	4.45779483528204E-03	6.81200422251087E-03	5.1287216167418			
373	6.00025229210758E-03	6.24786032850075E-03	6.04538139330501E-03	3.91244586506809E-03	2.9294044337142E-03	4.6019606116886E-03	4.8083335821243			
374	6.5319139593351E-03	7.0178852292015E-03	5.58075423560401E-03	4.62321695319602E-03	4.61828045665162E-03	4.82362471352156E-03	3.8178350949531			
375	7.6376132700747E-03	7.91181094824116E-03	6.65389897851561E-03	6.0387147151018E-03	6.00687389183994E-03	6.58514838113787E-03	3.5934746264704			
376	8.8477371787999E-03	8.05810985748991E-03	8.05834084153366E-03	7.21750818417306E-03	5.76606320290367E-03	7.45518962987123E-03	5.0157688004176			
377	9.7828205288896E-03	7.49537976501762E-03	6.85910297324888E-03	8.10092538657361E-03	5.4248206830324E-03	4.43570146179583E-03	7.9123215880070			
378	7.27380023279947E-03	6.88215835845873E-03	7.26997033485752E-03	8.18094715373583E-03	4.26940080490535E-03	4.76230048624641E-03	7.6617912980839			
379	5.81006516986036E-03	5.21704353498367E-03	6.82627549510232E-03	6.68413006169000E-03	4.00893509767878E-03	6.00927330041289E-03	6.5278496586343			
380	7.19654023417605E-03	3.353257848939E-03	4.77856355685666E-03	4.83288617616394E-03	5.32899860243502E-03	5.86721493166195E-03	6.3555642916603			
381	0.27519732026296E-03	6.79184024353707E-03	6.56557159458981E-03	7.31587993349044E-03	5.91042580409945E-03	6.10672817607260E-03	5.1274255722286			
382	11.2398381159505E-03	7.1391285982386E-03	9.24443143693952E-03	7.75551872905849E-03	7.089069792536784E-03	6.055531241443E-03	5.218901941607			
383	8.36689041318292E-03	7.04658216343737E-03	8.90559354530436E-03	6.46471996150920E-03	6.8235860325785E-03	6.16321214394004E-03	6.5155027395330			
384	5.79418325102043E-03	7.63577179959369E-03	4.10251915649745E-03	5.81159814186768E-03	3.9275969379253E-03	4.28994904626933E-03	7.5796341997334			

Figura 49, Datos exportados en .txt



En el momento de la revisión de los puntos se encontraron incongruencias en las curvas espectrales de 4 puntos muestreados, es por ello que se procedió a eliminar dichos puntos. Por lo tanto, se obtuvieron 137 archivos en .txt con las 10 mediciones de cada punto, para cada longitud de onda (350-2500 nm). Estos archivos fueron almacenados para el posterior cálculo de NDVI.

#### 4.2.2.3 NDVI por cada punto

Utilizando un script en R, se calculó el valor de NDVI para cada uno de los puntos, utilizando pseudobandas. Como resultado se obtuvo una tabla que contiene las coordenadas, el código y el valor de NDVI de cada punto.

*Tabla 13*

*Ejemplo de puntos con su valor de NDVI*

No	E	N	Cod	NDVI
1	787856.184	9957530.62	E1_1	0.94925296
2	787864.025	9957530.62	E1_2	0.91008743
3	787860.105	9957537.41	E1_3	0.93004301
4	787867.946	9957537.41	E1_4	0.91455736
5	787864.025	9957544.2	E1_5	0.90592534
6	787864.025	9957557.79	E1_6	0.93503998
7	787871.867	9957557.79	E1_7	0.94237081
8	787879.708	9957557.79	E1_8	0.94688865
9	787875.788	9957564.58	E1_9	0.92512671
10	787883.629	9957564.58	E1_10	0.93784576
11	787848.342	9957571.37	E1_11	0.94627792
12	787871.867	9957571.37	E1_12	0.8897037
13	787879.708	9957571.37	E1_13	0.9035718
14	787836.58	9957578.16	E1_14	0.93599291
15	787844.422	9957578.16	E1_15	0.94143422
16	787852.263	9957578.16	E1_16	0.95188721
17	787832.659	9957584.95	E1_17	0.92489161
18	787840.501	9957584.95	E1_18	0.92538219

Continua 



19	787848.342	9957584.95	E1_19	0.87151172
20	787856.184	9957584.95	E1_20	0.87199758
21	787828.739	9957591.74	E1_21	0.93079584
22	787836.58	9957591.74	E1_22	0.9387319
23	787844.422	9957591.74	E1_23	0.95299418
24	787852.263	9957591.74	E1_24	0.93687539
25	787860.105	9957591.74	E1_25	0.87310922
26	787824.818	9957598.53	E1_26	0.94406938

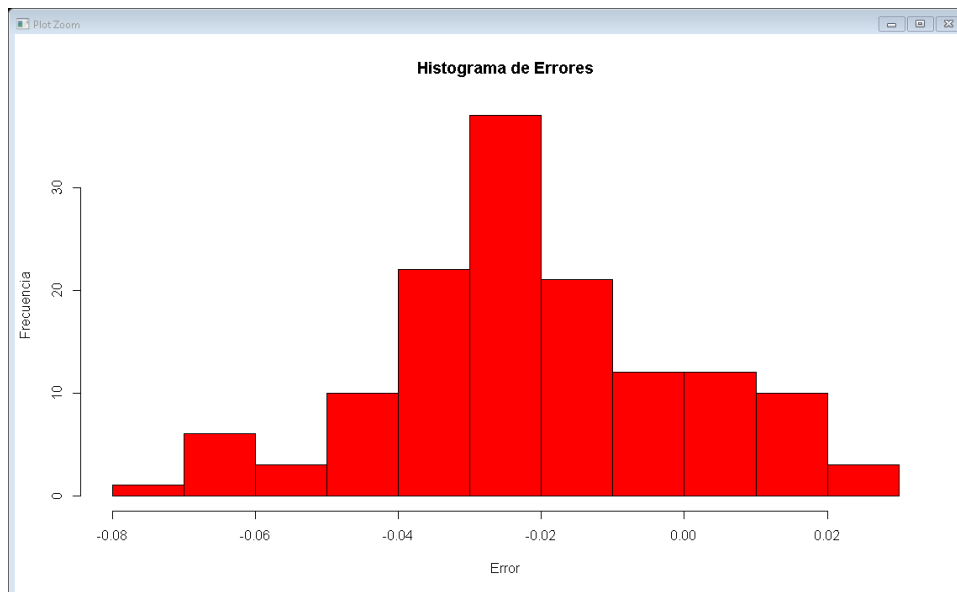
#### 4.2.2.4 Verificación y análisis de datos

Para definir los valores aceptables de la diferencia entre los valores obtenidos mediante el sensor Parrot Sequoia y el sensor FieldSpec 4, se realizó un análisis estadístico entre los puntos de muestreo y su valor equivalente en el modelo (1) y se obtuvieron los siguientes resultados (ver Tabla 14 y Figura 50).

*Tabla 14*

*Resumen estadístico de diferencias entre sensores*

<b>Diferencia entre sensores</b>	
<b>Media</b>	0.0209
<b>Error típico</b>	0.0018
<b>Desviación estándar</b>	0.0208
<b>Mínimo</b>	-0.0261
<b>Cuartil 1</b>	0.0086
<b>Mediana</b>	0.0244
<b>Cuartil 3</b>	0.0328
<b>Máximo</b>	0.0739
<b>Rango</b>	0.1000
<b>Suma</b>	2.8613
<b>Cuenta</b>	137
<b>Intervalo de confianza (95.0%)</b>	[0.0244 ; 0.0174]



*Figura 50, Histograma de errores entre sensores*

Como se puede observar en la Tabla 14, la media de las 137 muestras es 0.0209, lo que indica que los valores obtenidos mediante el espectrorradiómetro son ligeramente mayores a los obtenidos con el sensor Parrot Sequoia, en un intervalo de confianza (al 95%) de [0.0244 ; 0.0174]. Este intervalo nos indica que se puede indicar que las diferencias entre ambos sensores son aceptables si se encuentran en este rango.

### **4.3 Modelo geoestadístico, modelo NDVI (2)**

#### *4.3.1 Modelo geoestadístico de NDVI*

##### *4.3.1.1 Análisis exploratorio de datos*

En la Tabla 15 se muestra el resumen estadístico de los valores de NDVI de las 107 muestras.

Tabla 15

## Resumen estadístico

Resumen Estadístico – 107 muestras de NDVI	
Media	0.90754
Desviación Estándar	0.03426
Rango	0.18162
Coefficiente de Variación	0.03775
Asimetría	-1.23528
Mínimo	0.77308
1° Cuartil	0.88632
Mediana	0.91456
3° Cuartil	0.93123
Máximo	0.95470

El rango de los valores de la muestra es de 0.18162. La media y la mediana tienen valores cercanos, su diferencia es 0.00702. El coeficiente de variación es del 3% y el coeficiente de asimetría es negativo lo que indica que la distribución está levemente alargada hacia los valores inferiores a la media.

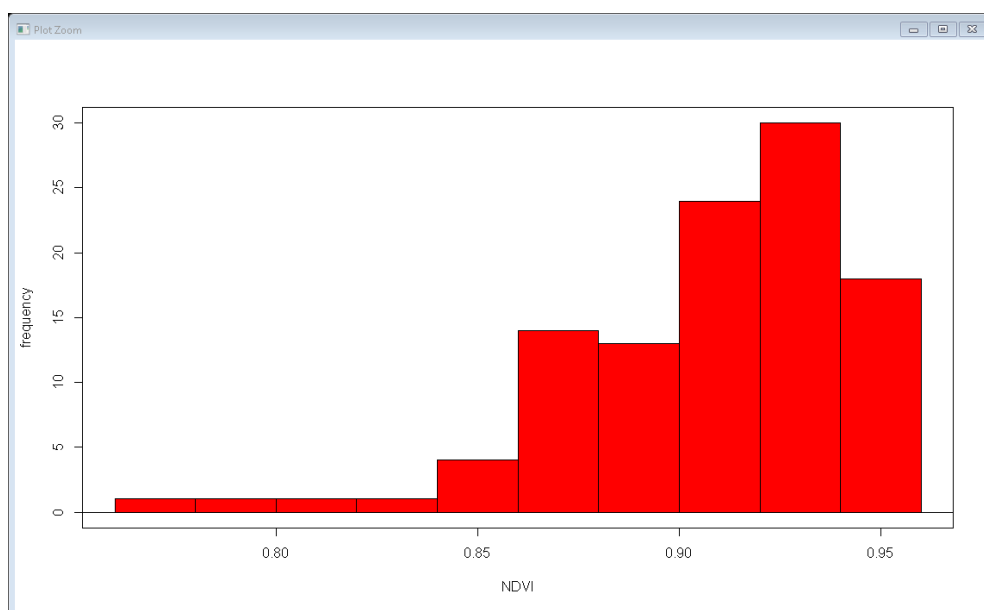
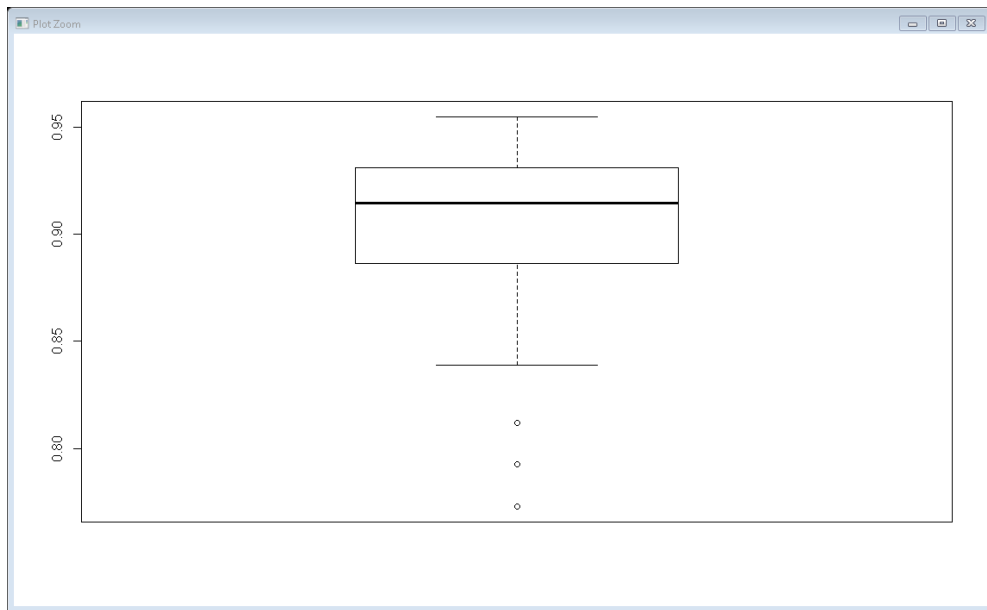
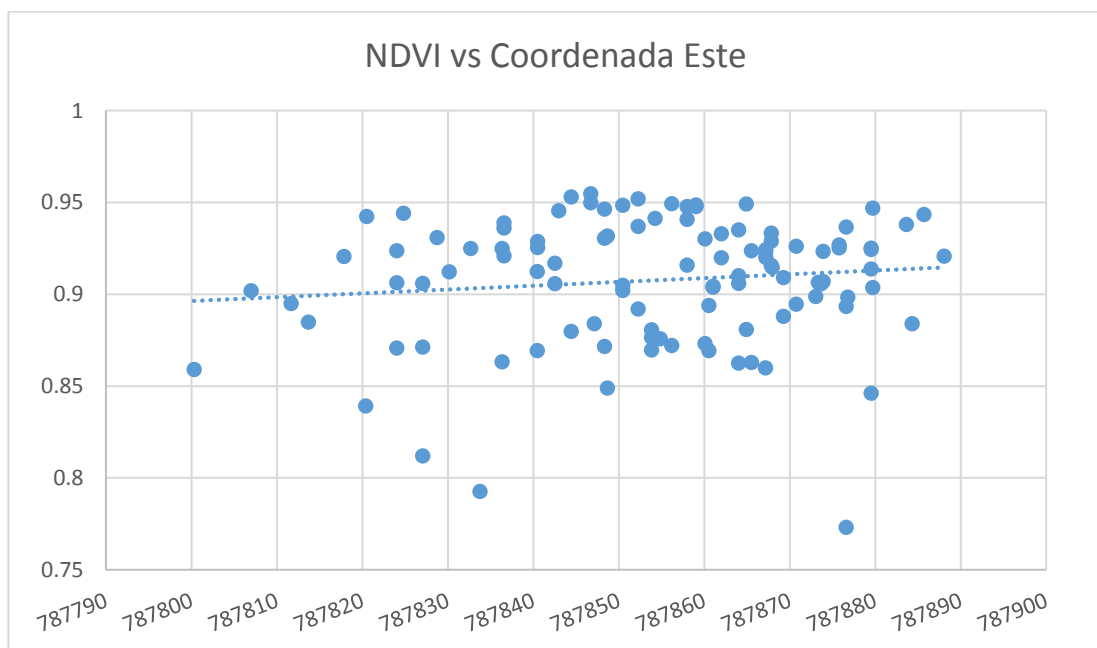


Figura 51, Histograma de NDVI



*Figura 52, Diagrama de Caja*

El histograma y el diagrama de caja nos confirman que la distribución está cargada hacia los valores inferiores a la media. Además, el diagrama de caja nos indica valores atípicos, pero en este caso no se los puede eliminar debido a la veracidad de los mismos.



*Figura 53, Gráfico de Dispersión Este-NDVI*

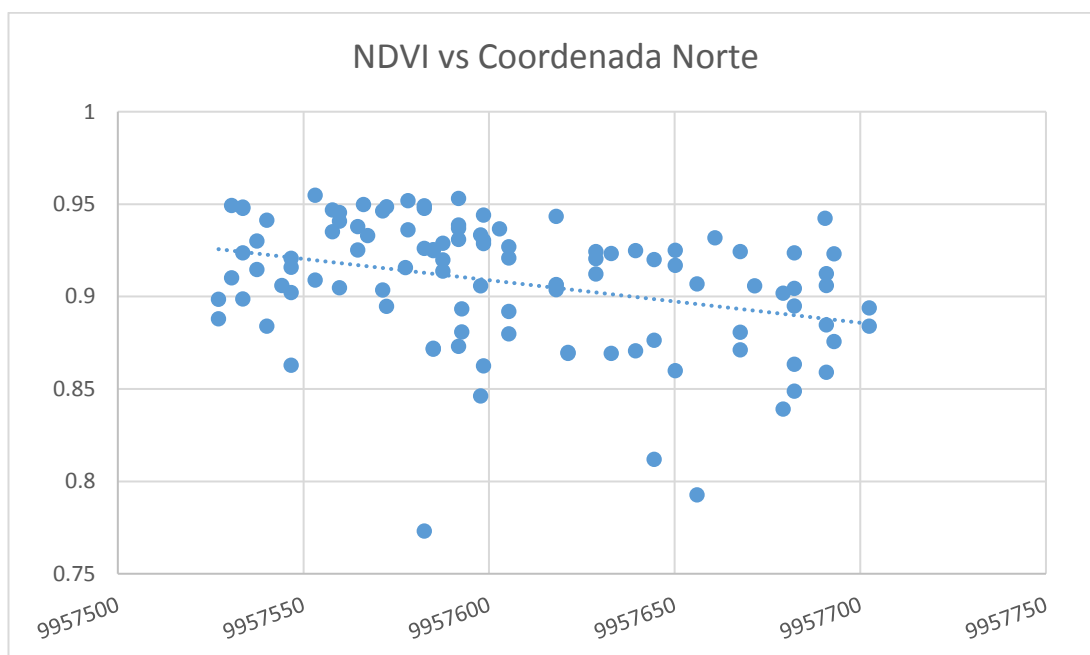


Figura 54, Gráfico de Dispersión Norte-NDVI

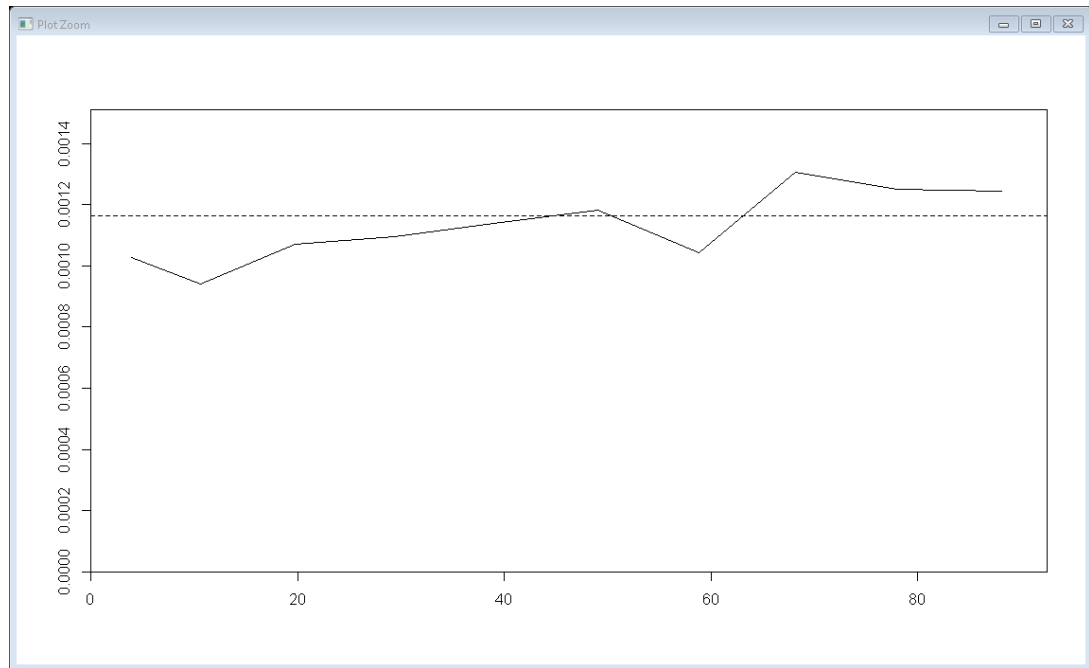
En el análisis de los gráficos de dispersión, se verifica una leve tendencia en ambas coordenadas, por lo que en el análisis estructural se podría esperar un modelo teórico que cumpla únicamente la hipótesis intrínseca.

#### 4.3.1.2 Variograma Experimental

Para la construcción del variograma experimental se utilizaron 107 muestras de NDVI de la zona de estudio, en base a un supuesto de isotropía. Tomando en cuenta la distribución espacial de las muestras (malla irregular) se definieron los siguientes parámetros:

- Lag = 9,8 m.
- Numero de pasos: 10
- Tolerancia de distancia equivalente al 50%: 4,9 m.
- Tolerancia angular: 90 grados.

El cálculo del variograma experimental se realizó en el software R, con la librería *RGeostats* y la función *vario.cal*.



*Figura 55, Variograma Experimental*

Con el análisis visual preliminar del variograma de la Figura 55, se pueden identificar las siguientes características:

- Puede presentarse efecto pepita (nugget effect)
- El valor de la meseta (sill) es de aproximadamente 0.00118
- Por su forma, los modelos teóricos que se pueden ajustar son: efecto pepita, gamma, exponencial, esférico, gaussiano, cubico y K-bassel

#### *4.3.1.3 Nube Variográfica*

La nube variográfica consiste en graficar el valor de todas las diferencias en función de la distancia entre los puntos. Con esta herramienta se pueden detectar valores anómalos en el cálculo del variograma. Con la herramienta de *RGeostats claud.cal* se genera la nube variográfica. Los resultados se presentan en la Figura 56. Se puede decir que existen valores atípicos, pero no se deben eliminar debido a que son datos reales sin presencia de inconsistencias.

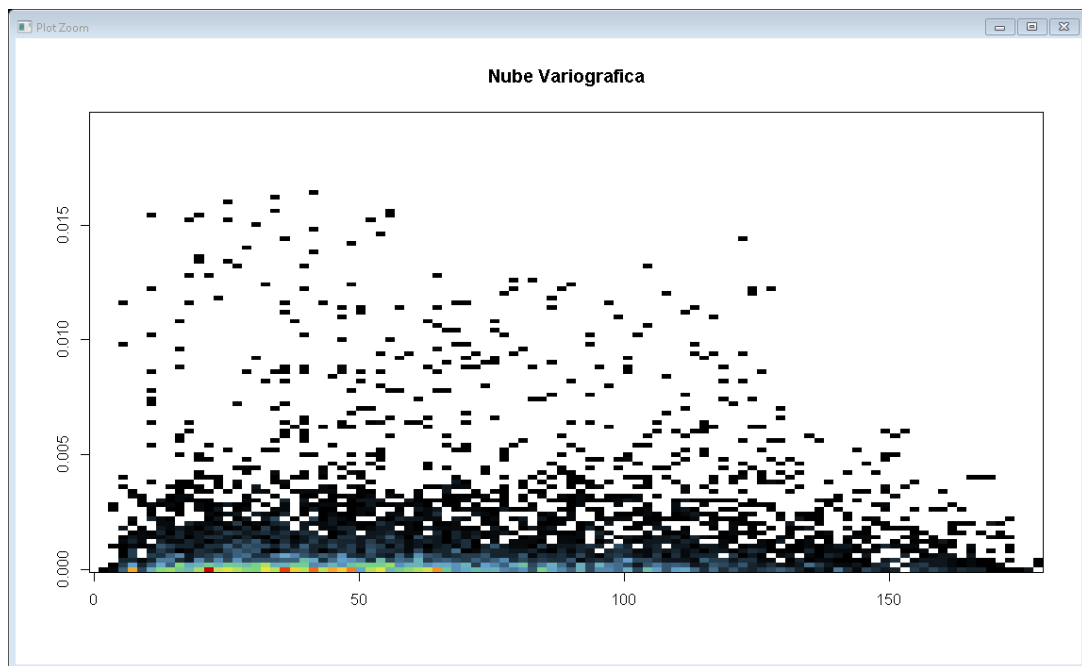


Figura 56, Nube variográfica

#### 4.3.1.4 Ajuste del variograma a un modelo teórico

Se debe ajustar un modelo teórico para disponer de una ecuación que se pueda utilizar en cálculos posteriores. Para ello se utilizó la herramienta *auto.model*, ingresando los modelos teóricos que se podrían ajustar (nugget effect, gamma, exponencial, esférico, gaussiano, cubico y K-bassel). El resultado que se obtuvo fue la estructura básica y no un modelo anidado. El modelo que mejor se ajustó al variograma experimental fue el modelo gamma, con los siguientes parámetros (ver E. 25 y Figura 57):

- Sill=0.00159
- Rango= 18555
- Parámetro= 0.28

E. 25

$$C(h) = 0.00159 \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{9.8}{18555}\right)^{0.28}} \right]$$

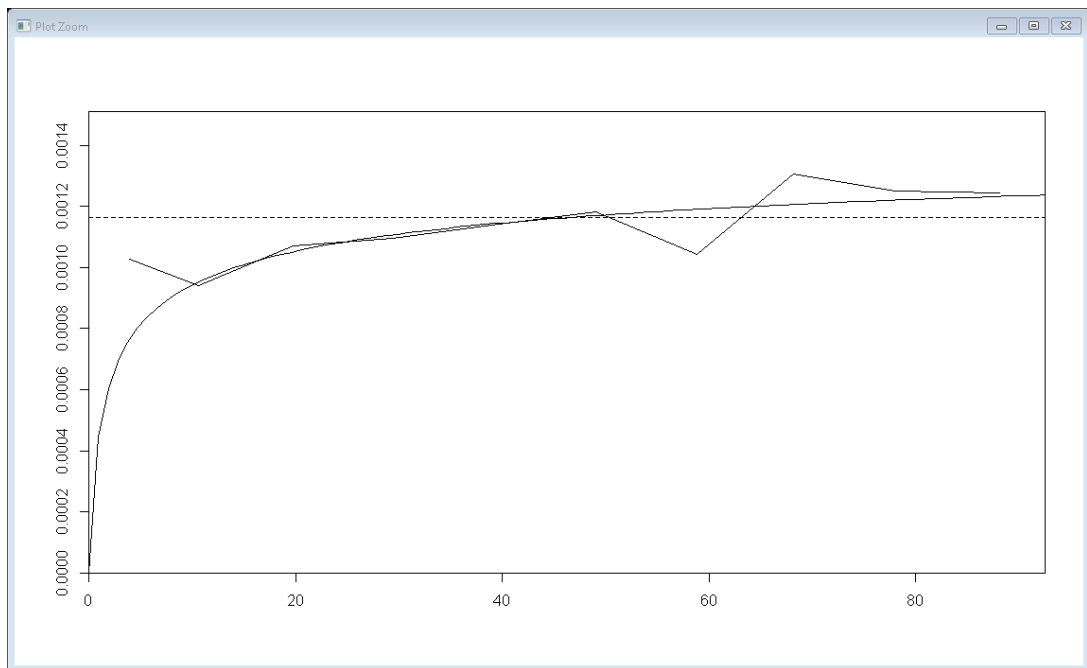


Figura 57, Modelamiento del variograma experimental

#### 4.3.1.5 Validación cruzada

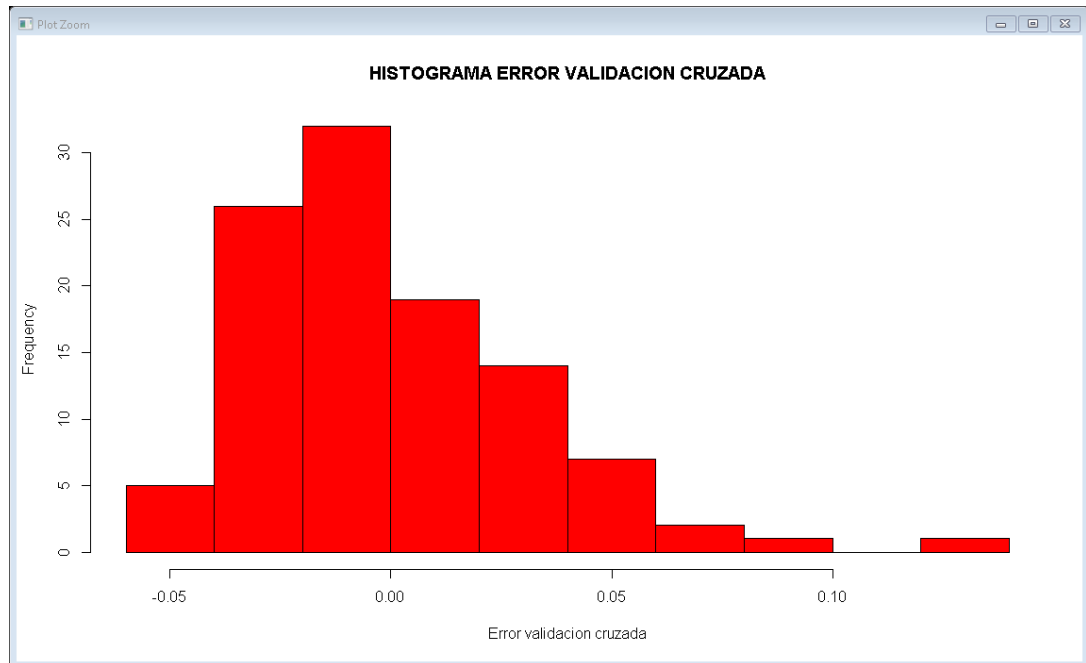
Para la realización de la validación cruzada, se definieron previamente las vecindades de búsqueda, concepto a través del cual se indica la forma en que se seleccionan las muestras para predecir el valor de un punto. A través de la herramienta *neigh.init* se definió la vecindad móvil con los siguientes parámetros:

- Mínimo número de muestras por vecindad: 8
- Máximo número de muestras por vecindad: 16
- Número de sectores: 8
- Máximo número de muestras por sector: 2
- Máxima distancia de búsqueda: 60 m.

Utilizando la herramienta de *xvalid*, se ejecuta la validación cruzada. Como salida de esta función se generan dos variables: error de validación cruzada para el modelo y error normalizado de validación cruzada para el modelo. Para una mejor interpretación de los resultados se genera un histograma del error de validación



cruzada, donde se puede apreciar una ligera tendencia de los datos hacia la izquierda de la curva (ver Figura 58).

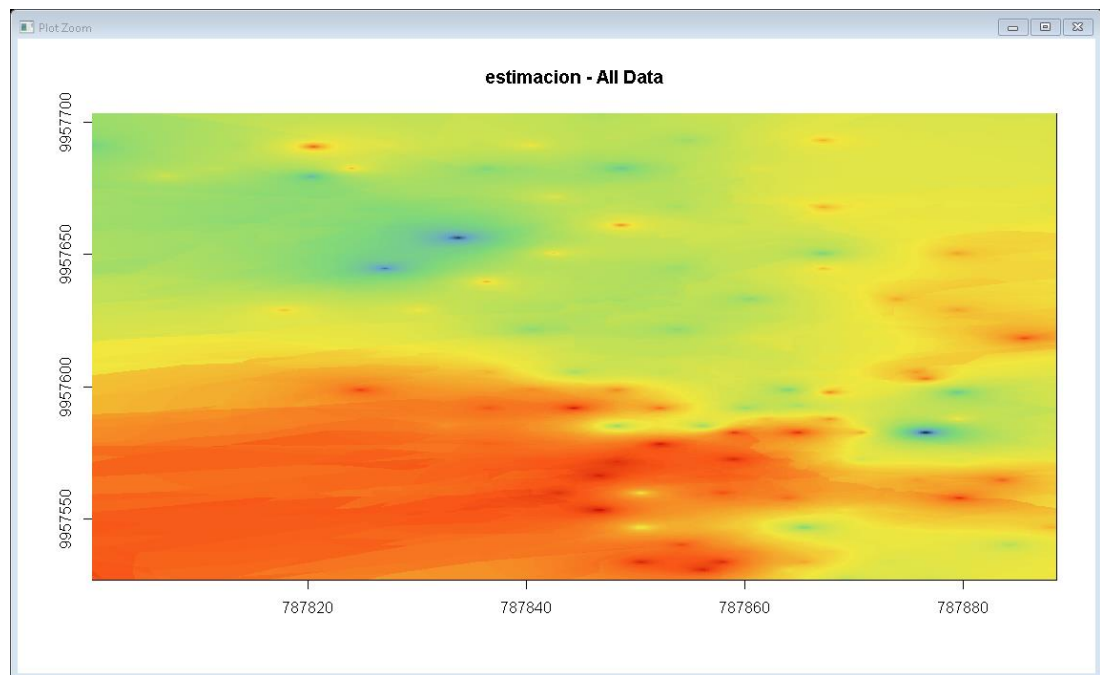


*Figura 58, Error de validación cruzada*

#### *4.3.1.6 Predicción*

La predicción espacial del NDVI se realiza a través del procedimiento de Kriging ordinario puntual. La predicción espacial se obtiene con la función kriging del paquete RGeostats, con los parámetros definidos anteriormente. El resultado de esta función es un mallado con los valores de la predicción en cada nodo y su respectiva desviación estándar del error de estimación.

En la Figura 59 se muestra el modelo de predicción de NDVI en el software RGeostats, en dos dimensiones, con tamaño de malla de 0.125 m \* 0.125 m, mientras tanto en la Figura 60 se muestra el modelo final en un software GIS.



*Figura 59, Modelo NDVI en R*

El error de estimación (Figura 61) muestra valores entre 0.00825 y 0.06861, considerando un nivel de confianza del 95 %.

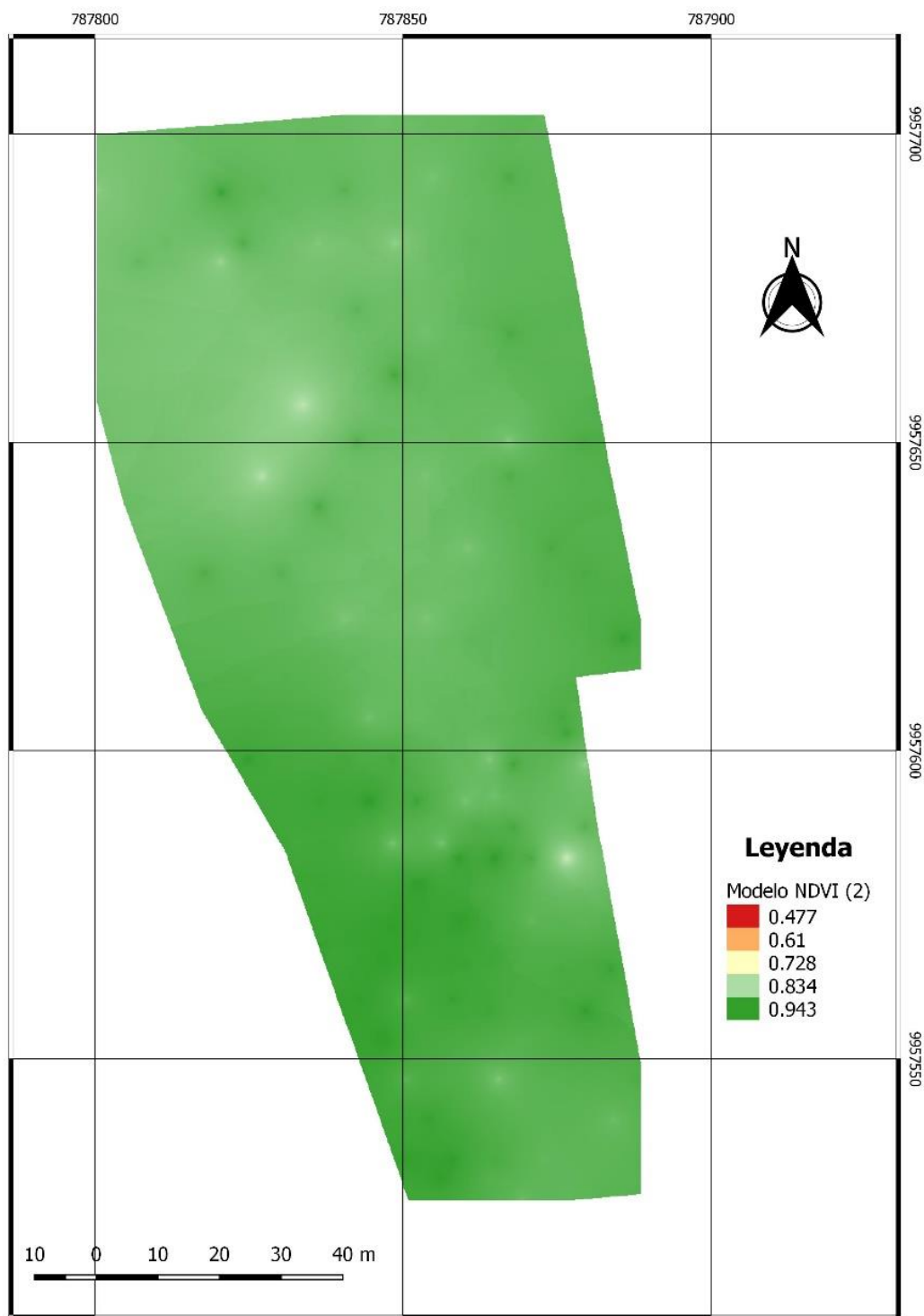
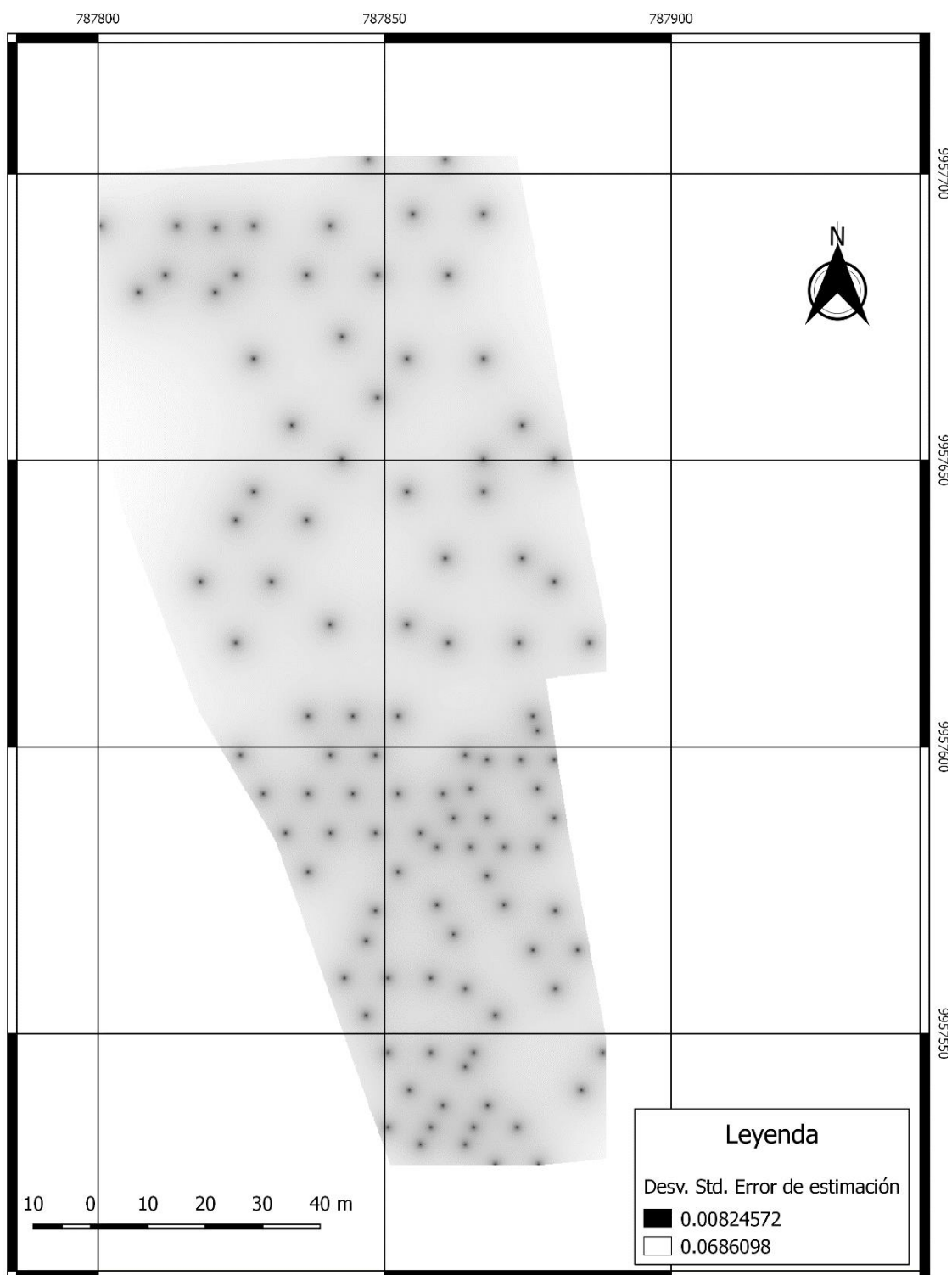


Figura 60, Modelo de Predicción de NDVI, Modelo NDVI (2)



*Figura 61, Error de estimación del modelo de predicción*

#### 4.4 Análisis y comparación de modelos resultantes

##### 4.4.1 Verificación de los modelos de NDVI con los puntos de validación

Para la verificación de los modelos se utilizaron 30 puntos seleccionados mediante muestreo aleatorio simple. Estos puntos fueron extraídos de la base de datos original y no se utilizaron en el modelamiento. El proceso consiste en comparar el valor obtenido en los modelos con el valor observado en el terreno. Esta diferencia genera un error de los modelos que puede ser analizado a través de estadística descriptiva. Los resultados de este análisis aparecen resumidos en la Tabla 16.

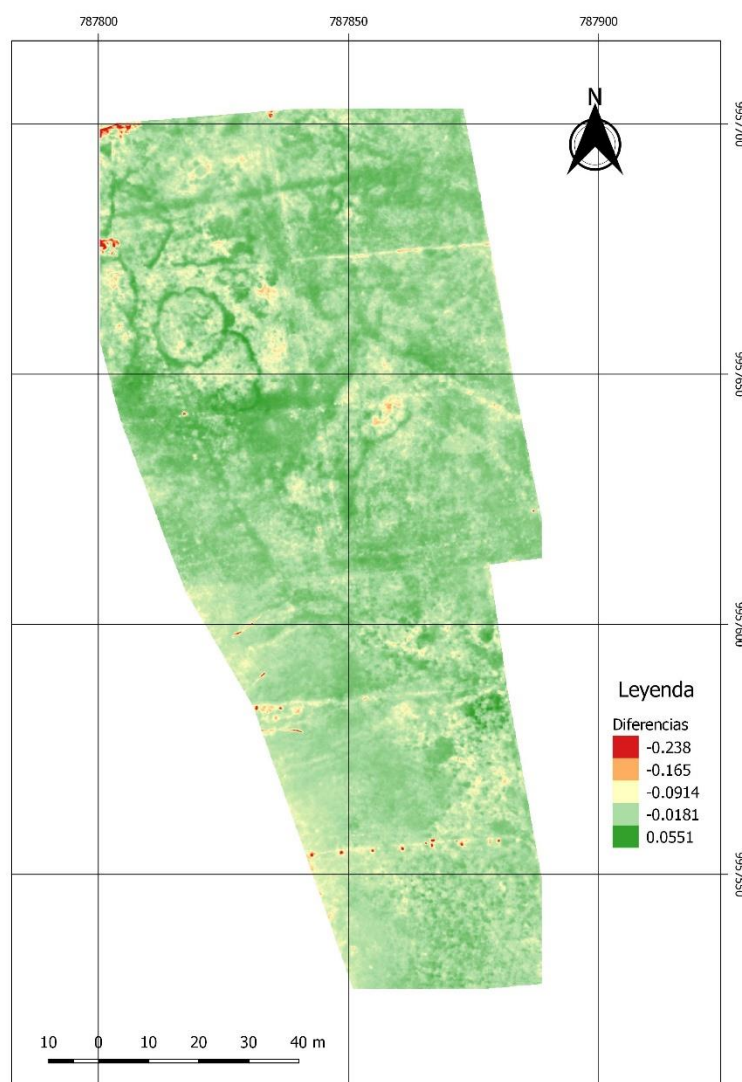
Tabla 16

Resumen estadístico de verificación de los modelos

NDVI Modelo 1		NDVI Modelo 2	
Error Medio	0.02305	Error Medio	-0.00060
Error típico	0.00371	Error típico	0.00504
Mediana	0.02535	Mediana	0.00625
Desviación estándar	0.02032	Desviación estándar	0.02758
Varianza de la muestra	0.00041	Varianza de la muestra	0.00076
Rango	0.08802	Rango	0.10839
Mínimo	-0.02256	Mínimo	-0.06573
Máximo	0.06546	Máximo	0.04266
Cuenta	30	Cuenta	30
Intervalo de confianza (95.0%)	[0.0303; 0.0158]	Intervalo de confianza (95.0%)	[0.0093; -0.0105]
Error cuadrático medio	0.00093	Error cuadrático medio	0.00074

##### 4.4.2 Análisis de correlación entre los modelos de NDVI (1) y (2)

Con la ayuda del software QGIS se ha realizado un análisis con el fin de evaluar las diferencias existentes entre el Modelo NDVI (1) y Modelo NDVI (2), obtenidas mediante los sensores Parrot Sequoia y FieldSpec4 respectivamente (Figura 62). El resultado de este análisis muestra diferencias mínimas de -0.238 y máxima 0.0551 entre ambos modelos.



*Figura 62, Modelo de diferencias, NDVI (1) - NDVI (2)*

Mediante el análisis de correlación de Pearson, se obtuvo una correlación de 0.7689, lo que se interpreta como una correlación positiva según la Tabla 8 de la escala cualitativa de Díaz (2015).

De la misma forma se definió el coeficiente de determinación  $R^2$ , que cuantifica la bondad del ajuste de los modelos. El resultado de este coeficiente se expresa en tanto por 1. Para el cálculo de este, solamente se requiere elevar al cuadrado el coeficiente de Pearson. Para el presente estudio se obtuvo un valor de  $R^2 = 0.5912$  que se define como una bondad de ajuste positiva, según la Tabla 9 definida por Díaz en (2015).

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

En el proceso de validación en condiciones de laboratorio del sensor multiespectral Parrot Sequoia se obtuvieron datos insuficientes para realizar un análisis estadístico óptimo. Es así que, para la validación entre sensores se utilizó la información obtenida en campo.

La comparación efectuada entre los sensores Parrot Sequoia y el espectrorradiómetro FieldSpec4, indica que con 137 puntos de muestreo la desviación estándar es 0,0209. Al 95% de confianza, se obtuvo un intervalo de [0.0244; 0.0174], con error medio cuadrático de 0.00087. Los valores del espectrorradiómetro tienden a ser mayores que los del sensor Parrot Sequoia.

Se obtuvieron cuatro mosaicos de reflectancia para las bandas del rojo, azul, verde e infrarrojo cercano, con una resolución espacial de 12,5 cm., a partir del sensor multiespectral Parrot Sequoia.

Para el diseño del plan de muestreo se realizó una clasificación visual de la parcela en zonas homogéneas, obteniendo como resultado dos zonas y cinco subzonas. Dentro de dichas zonas se distribuyeron en una malla hexagonal los 141 puntos a muestrear.

Se aplicaron una combinación de técnicas para obtener información espectral. Mediante el sensor FieldSpec4 y a través de replanteo RTK, se recolectó información espectral en un rango de 350 - 2500 nm, con una resolución espectral de 1 nm. Se utilizaron únicamente los valores que oscilaban entre 640 – 810 nm, correspondiente a las longitudes de onda del rojo y del infrarrojo cercano, necesarios para calcular NDVI.

A partir de los datos de reflectancia obtenidos con el espectrorradiómetro FieldSpec4, se generaron pseudobandas espectrales para el *RED* y el *NIR*. Con estas pseudobandas se calcularon los valores de NDVI para los puntos del muestreo.

La base de datos con los valores de NDVI se dividió, mediante un muestreo aleatorio simple, en dos partes: una primera con 107 puntos para generar el modelo geoestadístico (modelo 2); y una segunda con 30 puntos para validar ambos modelos.

El análisis exploratorio de datos de los 107 puntos utilizados para el modelo geoestadístico, presentaron una media de 0,90754 y una desviación estándar de 0,0342. El diagrama de caja mostró 3 valores considerados atípicos; a pesar de eso, no se pueden descartar ya que se concluyó que no existían anomalías en la toma de los datos. En el análisis de los gráficos de dispersión, se verifica una leve tendencia en ambas coordenadas, por lo que en el análisis estructural se podría esperar un modelo teórico que cumpla únicamente la hipótesis intrínseca.

El análisis visual del variograma experimental arrojó la posibilidad de existencia de efecto pepita, ya que existía una discontinuidad en el inicio del variograma. En un primer análisis, esto se puede asociar a errores en la medición de los datos, como dice Giraldo (2007). Posteriormente se comprobó mediante el Software R que no existía efecto pepita, por lo que se puede concluir que esta discontinuidad se pudo presentar debido a que el tamaño del lag=10m no puede representar cambios de NDVI en ciertas zonas de la parcela.

A la hora de llevar a cabo la predicción de la variable NDVI en el modelo geoestadístico, se puede observar que el variograma teórico que mejor se ajustó al variograma experimental resultante, fue un modelo *gamma* implementado con las siguientes características: sill=0.00159, rango=18555 y parámetro=0.28. El modelo de errores de estimación muestra valores de NDVI entre 0.0083 y 0.0686, al 95% de confianza.



El análisis de diferencias entre los modelos de NDVI (1) y (2) obtenidos mediante los sensores Parrot Sequoia y FieldSpec4 respectivamente, muestran diferencias entre [-0.238; 0.0551]. Sin embargo, realizando un análisis visual preliminar, se observa que la mayor parte de estas diferencias no pertenecen a vegetación, si no a valores atípicos provocados por factores anómalos (postes, árboles caídos, etc.) y que generan valores de NDVI bajos, que no son detectados por el modelo geoestadístico. Esto es debido a la ambigüedad que genera el muestreo de los puntos, es decir, si se pudiera realizar un muestreo infinito de puntos dentro de la parcela, sí se podrían detectar estos valores anómalos. Contrariamente se pudo comprobar que el modelo obtenido con el UAV si es capaz de tener en cuenta estos valores anómalos.

Mediante el análisis de error medio y error medio cuadrático se concluye que el modelo (2) es mejor; sin embargo, es necesario indicar que el modelo (1) representa mejor la realidad, ya que puede caracterizar de mejor manera cambios abruptos de la variable debido a factores antrópicos y/o naturales, como senderos, postes, árboles caídos, etc., que el modelo (2) no puede realizar.

El análisis de correlación de Pearson entre los modelos de NDVI (1) y (2) arroja una correlación positiva con un valor de 76,89 % de correlación además de un valor de  $R^2 = 0.5912$  el cual se define como una bondad de ajuste positiva.

## **5.2 Recomendaciones**

En base a los resultados obtenidos, los dos modelos de NDVI obtenidos se ajustan a la realidad. Sin embargo, en términos de rendimiento, se puede comprobar que el uso de plataformas aéreas no tripuladas UAV fue capaz de reducir considerablemente los costos y los tiempos, frente a la colección de datos radiométricos y generación de un modelo por técnicas geoestadísticas.

Para realizar una correcta validación de equipos en condiciones controladas de laboratorio, se recomienda diversificar y ampliar el número de las muestras, para obtener una cantidad de datos suficiente para un mejor análisis estadístico y una mejor evaluación. Adicionalmente sería adecuado variar las condiciones de luz y evaluar su posible incidencia en la captura de información espectral.

A pesar de que los equipos utilizados realizan una corrección radiométrica, mediante calibración previa a la toma o corrección posterior a esta, se recomienda que los plazos de captura de datos sean los más cortos posibles ya que la variación de las condiciones de humedad, hora y temperatura pueden generar cambios sobre la vegetación e incidir en la evaluación de estos productos.

## BIBLIOGRAFÍA

- ADS Inc. (2008). RS3™ User Manual. Boulder, Colorado, USA. Recuperado el 20 de 02 de 2017, de <http://support.asdi.com/Products/Products.aspx>
- Agencia Estatal de Seguridad Aérea. (octubre de 2014). Marco Regulatorio. *Requisitos de vuelo para drones para uso legal*. Madrid, España. Recuperado el 19 de noviembre de 2016, de [http://www.seguridadaerea.gob.es/lang\\_castellano/cias\\_empresas/trabajos/rpas/marco/default.aspx](http://www.seguridadaerea.gob.es/lang_castellano/cias_empresas/trabajos/rpas/marco/default.aspx)
- Alves, M. (2006). Sensores Remotos. En PROCISUR, *Agricultura de Precisión: Integrando Conocimientos para una Agricultura Moderna y Sustentable* (págs. 87-90).
- Arce Carriel, M. (2009). Normal climática y distribución de la precipitación de la hacienda El Prado-IASA. *Serie Zoológica*, 126-128.
- ASD Inc. (Enero de 2002). FieldSpec Pro User's Guide. Boulder, Colorado, USA. Recuperado el 20 de 02 de 2017, de <http://www.support.asdi.com/Document/FileGet.aspx?f=600000.PDF>
- ASD Inc. (2017). *ASD Inc.* Recuperado el 20 de 02 de 2017, de Productos y servicios: <https://www.asdi.com/products-and-services/fieldspec-spectroradiometers>
- Barrientos, A., del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., & Rossi, C. (2007). *Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 12 de 02 de 2017, de [webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf](http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf)
- Bongiovanni, R., Mantovani, E., Best, S., & Roel, Á. (2006). *Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. IICA: Procisur.
- Bonneval, H. (1972). *Photogrammétrie générale, tome I: enregistrement photographique des gerbes perspectives*. París: L'IGN.
- Chartuni, E., Pinto, F. d., & de Queiroz, D. (2006). Introducción a la Agricultura de Presición. En PROCISUR, *Agricultura de Precisión: Integrando Conocimientos para una Agricultura Moderna y Sustentable* (págs. 13-19).
- Claret, M., Best, S., & León, L. (2006). Sistemas de Posicionamiento. En PROCISUR, *Agricultura de Precisión: Integrando Conocimientos para una Agricultura Moderna y Sustentable* (págs. 25-31).
- Diáz, J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos en la agricultura de precisión*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

- Díaz, J. J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Madrid, España.
- Díaz, M. (2002). *Geoestadística Aplicada*. Cuba: Instituto de Geofísica, UNAM.
- DJI. (13 de 02 de 2017). *Matrice 100 Especificaciones*. Obtenido de DJI: <https://www.dji.com/es/matrice100/info>
- Emery, X. (2007). *Apunte de Geoestadística*. Facultad de Ciencia Matemáticas: Universidad de Chile.
- Esparza, A., Eslava, D., Flores, H., Lucho, E., Sánchez, L., & López, H. (2016). *Geoestadística: Planeamiento de Mina*. (U. C. VXI, Ed.) Escuela Profesional de Ingeniería en Minas.
- Ezcaray, I. (2012). *Agricultura de Precisión: Elaboración de Mapas de Consumo y Resbalamiento*. Universidad Pública de Navarra.
- GAD del cantón Rumiñahui. (2010). Ortofotomosaico escala 1:5000. Sangolquí, Ecuador.
- García, E., & Flego, F. (N.D.). Agricultura de Presición. *Tecnología Agropecuaria*, 99-116.
- Giraldo, R. (2007). *Introducción a la Geoestadística, Teoría y Aplicación*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- González-Regueral, C., Herranz, F., & Calvo, P. (2014). ¿Cómo clasificamos los sistemas aéreos no tripulados? *Perfiles IDS*, 12.
- Hernández Palma, J. (2011). Procesamiento Digital de Imágenes. *Manejo y Conservación de Recursos Forestales*, 7-8.
- Hernández, D. (2006). *Introducción a la fotogrametría digital*. Ciudad Real: E.T.S.I. Agrónomos.
- Holdridge, L. R. (1982). *Curso de ecología vegetal*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas IICA.
- INEC. (2015). *ENCUESTA DE SUPERFICIE Y PRODUCCIÓN AGROPECUARIA CONTINUA*. Quito: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- Jauregui, L. (02 de Noviembre de 2005). *Universidad de los Andes*. Recuperado el 25 de Enero de 2017, de <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Fotogrametr%EDa/FOTOGrametrIA%20DIGITALparte1.pdf>
- Karszenbaum, H., & Barraza, V. (2016). Introducción a la teledetección cuantitativa. *IAFE CONICET*. Buenos Aires.

- Leiva, C. (2014). *Determinación de Modelos de Predicción Espacial de la Variable Ondulación Geoidal, para la zona Urbana del cantón Quito y la zona rural del Cantón Guayaquil, Utilizando Técnicas Geoestadísticas*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- MAGAP. (2014). Mapa de Uso y Cobertura de suelo. Quito, Ecuador.
- Oliver, M. (2010). An Overview of Geostatistical and Precision Agriculture. En M. oliver, *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. New York: Springer Science.
- Orellana, J., Best, S., & Claret, M. (2006). Sistemas de Información Geográfica (SIG). En PROCISUR, *Agricultura de Presición: Integrando Conocimientos para una Agricultura Moderna y Sustentable*.
- Parrot. (13 de 02 de 2017). *Parrot Sequoia*. Obtenido de <https://www.parrot.com/es/profesional/parrot-sequoia#parrot-sequoia->
- Pérez, J. A. (2001). *Apuntes de fotogrametría II*. Recuperado el 09 de febrero de 2017, de Universidad de Mérida: [http://www.cartesia.org/data/apuntes/fotogrametria\\_analitica/ApuntesFotogrametria2.pdf](http://www.cartesia.org/data/apuntes/fotogrametria_analitica/ApuntesFotogrametria2.pdf)
- Pix4D. (2017). Software fotogramétrico Pix4D. Lausanne, Suiza. Recuperado el 20 de 02 de 2017, de <https://pix4d.com/>
- Quirós Rosado, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil* (Vol. I). (S. d. Publicaciones, Ed.) Cáceres, Extremadura: Universidad de Extremadura. Obtenido de [http://mascvuex.unex.es/ebooks/sites/mascvuex.unex.es.mascvuex.ebooks/files/file/Fotogrametria\\_9788469713174\\_0.pdf](http://mascvuex.unex.es/ebooks/sites/mascvuex.unex.es.mascvuex.ebooks/files/file/Fotogrametria_9788469713174_0.pdf)
- Renard, D., & Ors, F. (2014). *RGeostats Manual*.
- Sani, J., Morillo, A., & Tierra, A. (2014). Vehículos aéreos no tripulados – UAV para la elaboración de cartografía escalas grandes referidas al marco de referencia SIRGAS-Ecuador. La Paz, Bolivia.
- Sierra, R. (1999). *Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental*. Quito, Ecuador: Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y EcoCiencia.
- TRIMBLE. (2015). Notas Técnicas TBC. Sunnyvale, California, USA. Recuperado el 17 de 02 de 2017, de <https://netcoretechno.com/web/wp-content/uploads/05/Hoja-Tecnica-Trimble-Business-Center.pdf>
- Universidad de Girona. (2016). Sistemas Espaciales de Teledetección. Girona, Italia. Obtenido de [www3.udg.edu/dghha/cat/secciogeografia/prac/geo\\_hum\\_ap/u1030384\\_ResumGIS.rtf](http://www3.udg.edu/dghha/cat/secciogeografia/prac/geo_hum_ap/u1030384_ResumGIS.rtf)

Viera, M. A., & Gonzales, R. C. (2002). *Geoestadística aplicada*. (T. y. Ministerio de Ciencia, Ed.) México DF.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Zamorano, J. (2015). *TÉCNICAS EXPERIMENTALES EN ASTROFÍSICA*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. Recuperado el 10 de Enero de 2017, de [pendientedemigracion.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/TEA/tea\\_05.pdf](http://pendientedemigracion.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/TEA/tea_05.pdf)

Zurita, B. (Mayo de 2015). Metodología para la obtención de catastro físico mediante el uso de nueva tecnología fotogramétrica. Quito, Ecuador.

**ANEXOS**