



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 LA CORRELACIÓN ENTRE EL
VOLUMEN Y VIGOROSIDAD VEGETAL DE PASTO CON LAS
CARACTERÍSTICAS DEL SUELO MEDIANTE TÉCNICAS DE
UAV”**

AUTORES: GREFA SÁNCHEZ, JOSÉ LUIS

YÁNEZ SIMBA, DIANA PRISCILA

DIRECTOR: SINDE GONZÁLEZ, IZAR

SANGOLQUÍ

2018

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**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 LA CORRELACIÓN ENTRE EL VOLUMEN Y VIGOROSIDAD VEGETAL DE PASTO CON LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO MEDIANTE TÉCNICAS DE UAV”**, realizado por el Sr. **JOSÉ LUIS SÁNCHEZ GREFA** y la Srta. **DIANA PRISCILA YÁNEZ SIMBA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requerimientos: teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar a los señores **JOSÉ LUIS GREFA SÁNCHEZ** Y **DIANA PRISCILA YÁNEZ SIMBA** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 20 de febrero de 2018



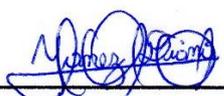
MSc. Izar Sinde González
DIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **DIANA PRISCILA YÁNEZ SIMBA**, con cédula N°: 172265458-7 y **JOSÉ LUIS GREFA SÁNCHEZ**, con cédula N°: 160055977-5, declaramos que este trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL VOLUMEN Y VIGOROSIDAD VEGETAL DE PASTO CON LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO MEDIANTE TÉCNICAS DE UAV**”, 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, 20 de febrero de 2018



Diana Yánez
CC: 1722654587



José Grefa
CC: 1600559775

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **DIANA PRISCILA YÁNEZ SIMBA** y **JOSÉ LUIS GREFA SÁNCHEZ**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL VOLUMEN Y VIGOROSIDAD VEGETAL DE PASTO CON LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO MEDIANTE TÉCNICAS DE UAV”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 20 de febrero de 2018

Diana Yánez
CC: 1722654587

José Grefa
CC: 1600559775

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios que me ha permitido culminar una etapa más de mi vida y gracias a sus bendiciones este camino ha sido más fácil.

A mis padres que con su apoyo incondicional y gracias a su ejemplo soy lo que soy. A mi hermanita Mishell que a pesar de todo ha estado en las buenas y malas.

A mi familia en general por siempre estar pendientes de mí y brindarme ese aliento para seguir adelante.

Diana Yáñez

A mi papá Maxi y mi mamá Consuelo los mejores padres del mundo, por su apoyo incondicional. A mis hermanos Franklin y Víctor que me motivan a ser mejor persona cada día.

José Grefa

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme salud y sabiduría necesaria para terminar esta etapa y poner a las personas correctas en mi camino.

A mis padres Miguel y Elisa sin ustedes no sería nadie solo me queda decirles un Dios le pague y gracias por darme ese ejemplo y perseverancia para alcanzar mis metas. No los defraudaré. Los amo <3.

A mi director de tesis Ing. Izar gracias por creer en nosotros y aprender juntos de esta investigación. No solo es un buen profesor si no un gran amigo.

Agradezco al Dr. Patricio Pérez por darnos todas las facilidades para realizar este proyecto. A su vez agradezco a la Dra. María de la Luz Gil Docampo y a Marcos Arza por el apoyo durante la estancia de investigación en la Universidad de Santiago de Compostela.

A José P. (jota) gracias por tu amor incondicional y llegar a mi vida en el momento indicado para compartir conmigo las alegrías y penas, mi mochilero favorito vamos por más momentos juntos.

A mis amigos que me han acompañado todo este camino gracias por su estar ahí, hicieron de esta etapa la mejor.

Diana Yáñez

Agradezco a la vida por darme unos padres maravillosos y hermanos que siempre están para darle un toque loco a la vida. A mis tíos, Mauricio y Patricia, que el transcurso de esta etapa fueron como unos padres para mí. A Ing. Izar Sinde nuestro tutor por la paciencia y entusiasmo brindado en esta etapa. A Dra. María Luz do Campo, Ing. Marcos arza, Dr. Patricio Pérez por el apoyo investigativo. A mis amigos que siempre estuvieron en las buenas y las malas, gracias totales.

José Grefa

ÍNDICE

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Definición del problema	2
1.3. Justificación e importancia	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. Metas	4
1.6. Descripción del área de estudio.....	5
CAPÍTULO II.....	6
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
2.1. Fotogrametría	6
2.1.1. Evolución.....	6

2.1.2. Clasificación de la fotogrametría	6
2.1.3. Imagen digital.....	7
2.2. Sensores.....	8
2.2.1. Sensor Multiespectral.....	8
2.3. Vehículos aéreos no tripulados (UAV's)	9
2.3.1. Clasificación de los UAV's	9
2.3.2. Aplicaciones de los UAV's	10
2.4. Materiales y equipos.....	11
2.4.1. Lente 3.97 mm (NIR Red+ NIR)	11
2.4.2. Tarjeta de calibración	12
2.4.3. Trimble Bussiness Center (TBC).....	12
2.4.4. Agisoft PhotoScan.....	13
2.4.5. QGIS con complemento MAPPIR	13
2.5. Evaluación Multicriterio	13
2.5.1. Matriz de Saaty	14
2.6. Clasificación no supervisada	14
2.7. Índices de vegetación	15
2.7.1. Composición	15
2.7.2. Limitaciones de los índices de vegetación.....	16
2.7.3. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	17
2.8. Diseño experimental	18
2.8.1. Fundamentos del diseño experimental.....	18
2.8.2. Tipos de diseño experimental	19
2.9. Agricultura de precisión.....	20
2.9.1. Características	20
2.9.2. Ventajas de la agricultura de precisión	20

2.9.3. Aplicaciones concretas en la agricultura	21
2.10. Kikuyo (<i>Pennisetum clandestinum</i>)	22
2.10.1. Clasificación taxonómica	23
2.10.2. Características botánicas	23
2.10.3. Manejo.....	24
2.10.4. Composición química del kikuyo en base seca.....	24
2.11. Rye grass.....	25
2.11.1. Características botánicas	25
2.11.2. Clasificación Taxonómica	25
2.12. Variables físicas del suelo.....	26
2.13. Modelos digitales	27
2.13.1. Modelo Digital del Terreno (MDT)	27
2.13.2. Modelo Digital de Superficie (MDS).....	27
2.14. Álgebra de mapas	27
2.15. Biomasa.....	28
2.16. Correlación	28
2.17. Fundamentación Legal	28
CAPÍTULO III.....	30
METODOLOGÍA.....	30
3.1. GENERALIDADES	30
3.2. Caracterización de la zona de estudio	32
3.2.1. Parcelación.....	32
3.2.2. Pendiente	33
3.2.3. Luminosidad	34
3.2.4. Orientación	35
3.2.5. Muestreo y análisis del Suelo.....	36

	x
3.2.6. Tratamientos.....	38
3.3. Obtención de imágenes aéreas	38
3.3.1. Plan de vuelo.....	38
3.3.2. Puntos de control.....	39
3.3.3. Nivelación geométrica	40
3.3.4. Vuelo	41
3.3.5. Procesamiento de datos.....	42
3.4. Generación de índices de crecimiento.....	44
3.4.1. Especificaciones previas al estudio	44
3.4.2. Índices por evaluación multicriterio.....	45
3.4.3. Índice de vegetación diferenciada normalizada (NDVI)	48
3.4.4. Volumen de biomasa	51
CAPÍTULO IV	55
RESULTADOS Y DISCUSIONES	55
4.1. Ortomosaicos.....	55
4.1.1. Ortomosaico en RGB	55
4.1.2. Ortomosaico Multiespectral	56
4.2. Índice de crecimiento de pasto por EMC.....	57
4.3. Biomasa	62
4.4. Índice NDVI	62
4.5. Análisis de la correlación.....	71
CAPÍTULO V	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
5.1. Conclusiones.....	75
5.2. Recomendaciones	77
BIBLIOGRAFÍA	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Tipos de diseño experimental</i>	19
Tabla 2. <i>Clasificación taxonómica del kikuyo</i>	23
Tabla 3. <i>Composición química del kikuyo en base seca</i>	24
Tabla 4. <i>Clasificación científica del Rye Grass</i>	26
Tabla 5. <i>Variables físicas del terreno</i>	26
Tabla 6. <i>Tipos de correlación</i>	28
Tabla 7. <i>Parámetros de vuelo</i>	39
Tabla 8. <i>Altura de puntos de nivelación</i>	41
Tabla 9. <i>Normalización de Variables</i>	45
Tabla 10. <i>Escala de Saaty</i>	46
Tabla 11. <i>Pesos de las variables</i>	47
Tabla 12. <i>Número de parcelas sembradas y crecidas</i>	57
Tabla 13. <i>Pendiente, iluminosidad y orientación</i>	59
Tabla 14. <i>Índice de evaluación multicriterio</i>	61
Tabla 15. <i>Resumen estadístico</i>	61
Tabla 16. <i>Factor de densidad por tipo de pasto</i>	62
Tabla 17. <i>Índice de biomasa por volumen de parcela</i>	64
Tabla 18. <i>Análisis estadístico del NDVI</i>	70
Tabla 19. <i>Correlación entre índices</i>	72
Tabla 20. <i>Cultivo Rye Perenne</i>	73
Tabla 21. <i>Cultivo Rye Grass Anual</i>	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del IASA	5
Figura 2: Definición de una imagen digital	8
Figura 3: Bandas espectrales de sensores	8
Figura 4: Tipo de aeronaves utilizadas en los UAV's.....	10
Figura 5: Aplicaciones de los UAV	11
Figura 6: Lente NIR.....	12
Figura 7: Tarjeta de calibración.....	12
Figura 8: Escalas de medidas de Saaty	14
Figura 9: Metodología del proyecto.....	31
Figura 10: Trabajo en campo	32
Figura 11: Zona de estudio	33
Figura 12: Porcentaje de pendientes	33
Figura 13: Área de radiación solar en ArcGis	34
Figura 14: Radiación solar por metro cuadrado	35
Figura 15: Orientaciones.....	36
Figura 16: a.- 4 Zonas según topografía,	37
Figura 17: Tratamientos a los cultivos de pasto.....	38
Figura 18: Distribución de los puntos de control	40
Figura 19: Punto 2- base inicial de red de nivelación.....	40
Figura 20: Nivelación Geométrica	41
Figura 21: Líneas de Vuelo en Pix4D Capture	42
Figura 22: Ajuste fotogramétrico con los puntos de control	43
Figura 23: Código QR	43
Figura 24: Calibración de las imágenes	44
Figura 25: Raster de índices de variables.....	47
Figura 26: Clasificación no supervisada de 7 clases del modelo RGB	49
Figura 27: Reclasificación para zonas de crecimiento	49
Figura 28: Crecimiento de pasto dentro	50
Figura 29: NDVI rojo (suelo desnudo),.....	51
Figura 30: Distribución de muestras.....	51

Figura 31: aro metálico, coordenada, corte, recolección, secado, peso ...	52
Figura 32: Raster de parcela y diferencia de modelos.....	53
Figura 33: Crecimiento heterogéneo de las parcelas.....	54
Figura 34: Ortomosaicos en RGB	55
Figura 35: Ortomosaicos Multiespectrales.....	56
Figura 36: Variables físicas.....	58
Figura 37: Mapa de índice de crecimiento de pasto por EMC	60
Figura 38: Histograma de datos del índice de EMC.....	61
Figura 39: Mapa de índice de biomasa por volumen de parcela.....	65
Figura 40: Mapa del índice NDVI del mes de diciembre	66
Figura 41: Mapa del Índice de NDVI del mes de enero.....	67
Figura 42: NDVI Normalizado mes de diciembre	68
Figura 43: NDVI Normalizado mes de enero.....	69
Figura 44: Correlación del NDVI y la Cobertura Vegetal.....	71
Figura 45: Correlación entre BT-EMC.....	73
Figura 46: Correlación entre NDVI-EMC.....	74

RESUMEN

El avance tecnológico de la teledetección y los sistemas de información geográfica permiten el manejo de forma puntual de un cultivo. En el Ecuador la alimentación de la ganadería se basa principalmente en pastos, por consiguiente, este estudio tuvo como objetivo utilizar técnicas basadas en sensores remotos no tripulados y determinar la relación entre índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), biomasa y las variables físicas del suelo en tres especies forrajeras (kikuyo, *rye grass anual*, *rye grass perenne*) con y sin fertilización. La zona de estudio está ubicada en la hacienda El Prado IASA I con área de 8.335 m². Las fases del proyecto consistieron en: caracterización y análisis del suelo para proceder a la fertilización y siembra, ejecución de vuelos multitemporales con cámaras RGB e infrarrojo para generar ortomosaicos, además del cálculo de índices de evaluación multicriterio (EMC), NDVI y biomasa por volumen. La EMC integró variables de orientación, luminosidad y pendiente. La estimación de biomasa por volumen se obtuvo con la diferencia de crecimiento entre la etapa inicial y final. Se calculó el NDVI con álgebra de bandas. Finalmente se realizó una correlación entre NDVI y EMC cuyo valor fue 0,32 de r² ajustándose a una función lineal. Para la biomasa y EMC el valor de correlación fue de 0,42 siendo una correlación positiva débil. En general, el crecimiento y la vigorosidad del cultivo no son afectados de manera sustancial por las características del suelo, en especial al cultivo *rye grass anual*.

PALABRAS CLAVES:

- TELEDETECCIÓN
- PASTO
- IASA
- BIOMASA
- NDVI

ABSTRACT

The technological advancement of remote sensing and geographic information systems allow the management of a crop in a timely manner. In Ecuador the feeding of livestock, feed is mainly on pastures; therefore this study aimed to use techniques based on remote unmanned sensors and determine the relationship between Normalized difference vegetation index (NDVI), biomass and soil physical variables in three forage species (Kikuyo, rye grass annual, rye grass perennial) with or without fertilization. The study area is located in the Hacienda El Prado IASA I with area of 8,335 m². The phases of the investigation consisted in: characterization and analysis of the soil to proceed to the fertilization and sowing, execution of multitemporal flights with RBG and infrared chambers to generate orthomosaics, in addition to the calculation of evaluation indexes Multicriteria, NDVI and biomass by volume. EMC integrated orientation, luminosity, and slope variables. The estimation of biomass by volume was obtained with the difference in growth between the initial and final stages. NDVI was calculated with band algebra. Finally, a correlation was made between NDVI and EMC whose value was 0.32 of r² adjusting to a linear function. For biomass and EMC its correlation, value was 0.42 being a weak positive correlation. In general, the growth and vigor of the crop are not substantially affected by soil characteristics, especially the annual rye grass crop.

KEY WORDS:

- **TELEDETECTION**
- **GRASS**
- **IASA**
- **BIOMASS**
- **NDVI**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La principal fuente de alimentación y la más económica para la ganadería en el Ecuador es el pasto. Según el INEC los pastos sembrados y naturales representan el 20,67% y 19,5% respectivamente de un total de superficie de labor agrícola de 7.303.677 Ha (ESPAC, 2014; INEC, 2011).

El desarrollo de los pastizales permite una producción adecuada de leche y carne en el sector pecuario, satisfaciendo las necesidades de la población y generando un alto impacto económico y social (León, 2003). No existe un tipo de suelo específico para el crecimiento de esta planta. Por ello se debe aprovechar zonas con suelos pobres y con bajo contenido de materia orgánica. Sin embargo el alto valor nutritivo con un gran contenido de agua y material nitrogenado se presenta en forrajes jóvenes (Palacios *et al*, 2012).

La fotogrametría por medio de los RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) es una manera eficaz de conseguir información en la actualidad ya que permite obtener resultados de forma inmediata, con precisiones centimétricas y a tiempo real (Agüera *et al.*, 2013). A pesar de que sigue siendo necesario la toma de datos de campo para la verificación y control de las mediciones, con estas nuevas tecnologías se obtienen resultados continuos a partir de muestras puntuales que facilitan al agricultor en la toma de decisiones (Robles *et al.*, 2016). Mediante el procesamiento de imágenes se obtiene varios productos entre ellos: los Modelos Digitales de Terreno y los Modelos Digitales de Superficie (en adelante MDT y MDS respectivamente), los cuales pueden ser utilizados para el cálculo de volúmenes (Robles *et al.*, 2016).

El enfoque de integrar nuevas tecnologías con la agricultura de precisión, expande su uso a otros campos, tal es el caso de la actividad ganadera que dependen de la eficiente producción agrícola del pasto.

En la última década el utilizar RPAS ha revolucionado la realización de trabajos aéreos orientados a la toma de imágenes para aplicaciones agrícolas (Paruelo, 2008). Estas herramientas sirven de apoyo a un número creciente de estudios en campos muy diversos, entre ellos la agricultura de precisión. Esto implica una adecuada variabilidad espacial y temporal así como información georreferenciada para mejorar la producción agrícola (Meneses et al., 2015). Por ello, mediante el cálculo de volúmenes se estima la cantidad de biomasa en los cultivos fundamentalmente para conocer la productividad primaria neta (Seis & Del, 2010). En la actualidad se han trabajado en diferentes tipos de cultivos para evaluar la viabilidad del uso de los productos del RPAS. La correlación presentada en una investigación, entre biomasa y crecimiento de cebada calculada por Li en el año 2014 representa una forma eficiente ($R^2=0,81$) de estimación de biomasa a través de MDS (Li et al., 2014). Estos productos han demostrado alcanzar grandes precisiones en topografía. En un estudio realizado en el sur este de Madagascar se pudo capturó información de hasta 2 cm/pixel para una posterior clasificación supervisada por objetos empleada para otras aplicaciones (Selsam et al., 2017).

1.2. Definición del problema

La producción ganadera en el Ecuador depende de dos factores relevantes: suelos y pastos. Una calidad pobre de suelo no permite el adecuado desarrollo de este tipo de cultivo (Borbor, 2013). La agricultura en las últimas décadas está enfocada en la utilización de nuevas tecnologías para el desarrollo de cultivos con fines pecuarios (Madrigal, 2013). En el Ecuador a nivel local y regional este tipo de estudio es escaso o nulo. Sin embargo, en el Instituto Superior Andino-IASA ubicado en la hacienda “El

Prado” se pretende implementar nuevas técnicas y tecnologías ya que este sector y sus alrededores son eminentemente ganaderos.

En general, para la alimentación del ganado no se utilizan tratamientos ni métodos para el crecimiento del pasto, es por ello que no se consigue un adecuado rendimiento a nivel de producción. En el presente estudio se analizarán los factores que influyen en el crecimiento y nutrición en las diferentes etapas fisiológicas del pasto mediante la teledetección y GIS (Geographic Information System). Esto permitirá sustituir las técnicas convencionales de estudios del pasto para el mejoramiento en cantidad y calidad, optimizando tiempo y recursos.

1.3. Justificación e importancia

La investigación mediante la utilización de GIS y nuevas tecnologías accesibles para la teledetección permite la optimización de recursos y tiempo para el desarrollo de una agricultura sustentable. En el caso de este estudio la aplicación y empleo de estos medios tecnológicos está dirigido al monitoreo del crecimiento del pasto en sus diferentes etapas. Esto será beneficioso para lograr un manejo y aprovechamiento adecuado de suelos mejorando la producción de pasto. Adicionalmente el estudio será un componente del proyecto de investigación titulado: “Evaluación y crecimiento de *Pennisetum clandestinum* por medio de espectrorradiometría” desarrollado en el Departamento de Ciencias de la Vida con colaboración de docentes del Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción.

Esto hace referencia al trabajo multidisciplinario y complementario para obtener resultados óptimos tanto de la parte agrícola como en el análisis espacial del terreno a través de los sensores remotos.

Finalmente, el proyecto se orientó al cumplimiento del segundo Objetivo de Desarrollo Sostenible que propone fomentar la seguridad alimentaria mediante agricultura sostenible para una buena nutrición (Naciones Unidas, 2015). Del mismo modo, en El Plan Nacional Del Buen

Vivir se menciona la importancia de llevar a cabo estrategias de soberanía alimentaria para garantizar alimentación sana y nutritiva (Senplades, 2013) utilizando nuevas tecnologías en el desarrollo productivo de la agricultura para la mejora de producción y rendimiento pecuario.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Analizar la correlación entre el volumen y vigorosidad vegetal de pasto con las características del suelo mediante técnicas de UAV.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la zona de estudio en cuanto a sus variables físicas mediante la técnica de evaluación multicriterio.
- Obtener imágenes aéreas mediante un lente modificado instalado en un UAV para la realización del análisis del crecimiento del pasto en las etapas claves de su desarrollo.
- Obtener el valor de NDVI (vigorosidad) y biomasa a través de las imágenes captadas.
- Cuantificar la correlación que existe entre el crecimiento del pasto, el nivel nutricional y las variables físicas del terreno.

1.5. Metas

- Una base de datos geográfica con la información del área de estudio.
- Ortomosaicos en RGB de la zona de estudio.
- Ortomosaicos multiespectrales del área de interés.
- Un mapa con las zonas óptimas de cultivo obtenidas con el análisis multicriterio.

- Un mapa de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).
- Un mapa de volumen.

1.6. Descripción del área de estudio

En la actualidad el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha evolucionado de manera exponencial. En Ecuador el manejo de drones empezó como una solución tecnológica e innovadora para la generación de cartografía e investigaciones afines. Sin embargo el número de aplicaciones se extiende tanto a usos militares, logística y hasta la agricultura (Aguayo, 2010). Por ello la utilización de drones en diferentes proyectos pretende mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) generar nueva información con imágenes multispectrales para medir la calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación en condiciones específicas del terreno (Escribano *et al.*, 2015).

La zona de estudio se encuentra en la hacienda El Prado IASA I, ubicado en Sangolquí, provincia de Pichincha a 35 minutos de Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE como se observa en la Figura 1. La zona de estudio tiene un área de 8.335 m².

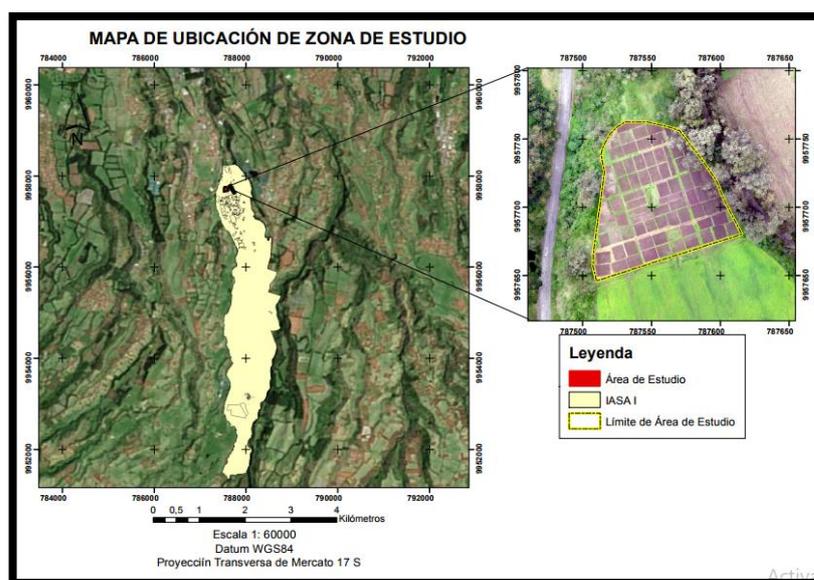


Figura 1: Ubicación del IASA

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Fotogrametría

2.1.1. Evolución

En los cincuenta años que lleva la fotogrametría hasta la actualidad, ésta ha logrado convertirse en una herramienta muy útil para la medición de cualquier variable de un objeto a través de fotografías. La gran amplitud de utilidades de la fotogrametría en temas espaciales lo posiciona como una metodología de medición casi indispensable (Pacheco & Pozzobon, 2011) .

Según la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (SIFSR), *“La fotogrametría es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas del objeto fotografiado”*. Poniendo así en efecto la precisión en forma, dimensiones y posición en el espacio cualquier objeto (García, 2002).

2.1.2. Clasificación de la fotogrametría

La fotogrametría se divide en dos de acuerdo al tipo de fotografía empleada (Herrera,1987).

Fotogrametría Aérea. - Representación usando fotografías tomadas desde un vehículo aéreo en un enfoque tal que el eje de la cámara fotográfica queda perceptiblemente perpendicular al terreno (Otero et al., 2008).

Fotogrametría Terrestre: El eje de la cámara fotográfica se encuentra en una posición tal que el eje de la cámara fotográfica está en paralelo u horizontal con el terreno (Otero et al., 2008).

También existe una clasificación por el tipo de captura y procesamiento:

- Fotogrametría Analógica: Su principal instrumento son restituidores mecánicos y ópticos. Con base a la marca flotante y con el proceso de alineación de imágenes para la creación de un modelo estereoscópico se pueden realizar mapas escalados y nivelados.
- Fotogrametría Analítica: Con la fusión de restituidores analógica y ordenadores se crea al restituidor analítico, optimizando los tiempos y recursos. Posibilitando obtener información en programas de tipo CAD.
- Fotogrametría Digital: Es una técnica estructurada básicamente con imágenes digitales y procesada con restituidores de estaciones fotogramétricas digitales, con fines de obtención cartográfica.

2.1.3. Imagen digital

El término más accesible de imagen digital según Pérez es “*Una imagen digital es una función $F(x, y)$, donde x e y representan unas coordenadas y el valor $F(x, y)$, es proporcional a la transmitancia o reflectividad de la luz, que se reconoce visualmente por el nivel de color o gris de la misma en el punto considerado (x, y)* ” (Pérez, 2001). Es este concepto que permite entender una imagen digital como un arreglo de filas y columnas en el cual cada una de estas celdas se encuentra un pixel, la unidad básica de una imagen digital, la misma que representa una superficie en función de su tamaño y su respectivo número digital como lo muestra la Figura 2.

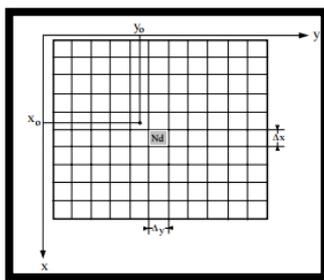


Figura 2: Definición de una imagen digital

Fuente: (Pérez, 2001)

2.2. Sensores

En los últimos años la tecnología de sensores remotos ha ido en crecimiento rápidamente, la utilización de sensores remotos en procesos de investigación y aplicaciones en el terreno son temas que han impulsado este cambio. La comercialización de sensores incrementado por la electrónica de consumo promovió la necesidad de resoluciones altas y de diferentes tipos como lo muestra la Figura 3. Además, la implementación de éstos en los drones ha incrementado su uso y facilidad de manejo (García, 2015).

SENSOR	BANDA ESPECTRAL
Visible –RGB (Cámara Fotográfica)	380-780 Nanómetros
Visible (Cámara de Video)	380-780 Nanómetros
Infrarrojo cercano	3 Bandas 500-950 Nanómetros
Multiespectral	18 Bandas 500-950 Nanómetros
Hiperspectral	400 Bandas 450-950 Nanómetros
Térmico	8-12 Micrómetros

Figura 3: Bandas espectrales de sensores

Fuente: (García, 2015).

2.2.1. Sensor Multiespectral

Este tipo de sensor puede captar hasta 6 bandas espectrales, generalmente este tipo de sensor se los utiliza para estudios de vegetación, agricultura, también son aplicables en biología, ciencias forestales, investigación ambiental, etc. pues permiten monitorear los pequeños

cambios en la radiación visible e infrarroja. Las variaciones infrarrojas indican cambios en la vegetación mucho antes de que aparezcan en el espectro visible.

El vuelo fotogramétrico se asemeja mucho al proceso de toma de imágenes multiespectrales pues después de tomarlas se realiza la corrección geométrica y se genera mosaicos de las imágenes. Además se necesita de calibración radiométrica integrando correcciones atmosféricas para obtener datos validos de reflectancia y temperatura de superficie (García, 2015).

2.3. Vehículos aéreos no tripulados (UAV's)

Un vehículo aéreo no tripulado (UAV), por sus siglas en inglés de Unmanned Aerial Vehicle, o sistema aéreo no tripulado UAS de Unmanned Aerial System, conocido popularmente como drone. Están equipados con equipos de última generación como GPS, sensores infrarrojos, cámaras de alta resolución y controles de radares. Los drones, son capaces de enviar información detallada a satélites, que luego la dan a conocer al control de tierra, todo en cosa de milésimas de segundos (Elika, 2013).

2.3.1. Clasificación de los UAV's

Según Barrientos de la Universidad Politécnica de Madrid la forma más fácil de clasificar a los UAV's es por el tipo de aeronave. Aquí se diferencian las que despegan verticalmente y las que no, ala flexible, auto-sustentados y ala fija como esta en la Figura 4 (Barrientos et al., 2009).

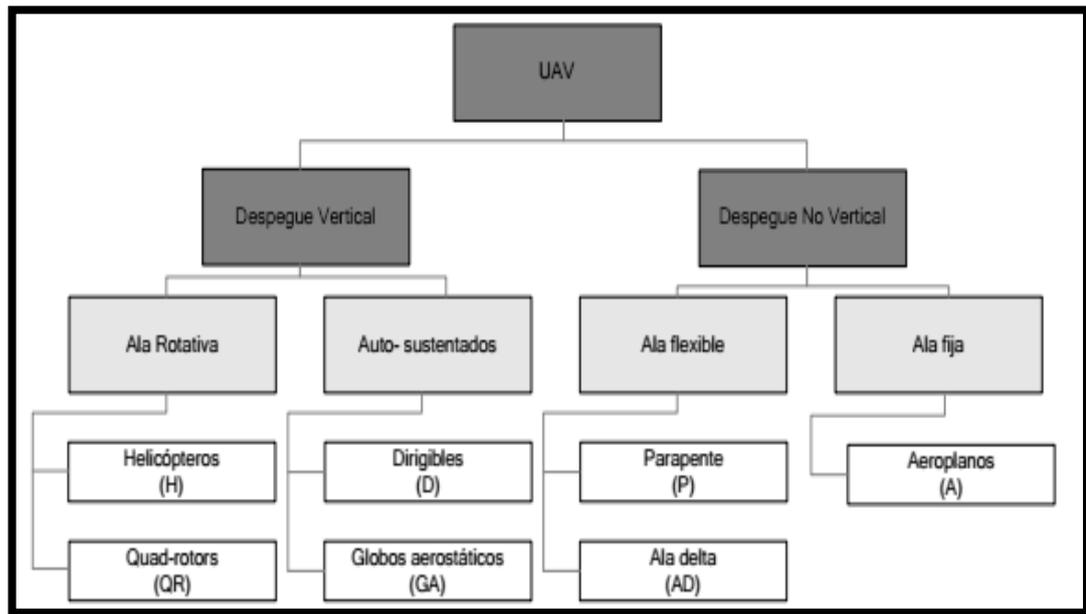


Figura 4: Tipo de aeronaves utilizadas en los UAV's

Fuente: (Barrientos et al., 2009)

2.3.2. Aplicaciones de los UAV's

Los UAV poseen una gran cantidad de aplicaciones en distintas áreas, debido a la facilidad de desplazarse por territorios inhóspitos con difícil topografía e inaccesibles para el hombre. Son capaces de superar cualquier tipo de obstáculo ofreciendo imágenes de calidad y otro tipo de información recogida por diferentes sensores a tiempo real y a bajo costo.

Las aplicaciones de los UAV's van desde uso militares hasta usos agrícolas la Figura 5 representa la variedad de aplicaciones existentes donde los drones son utilizados.

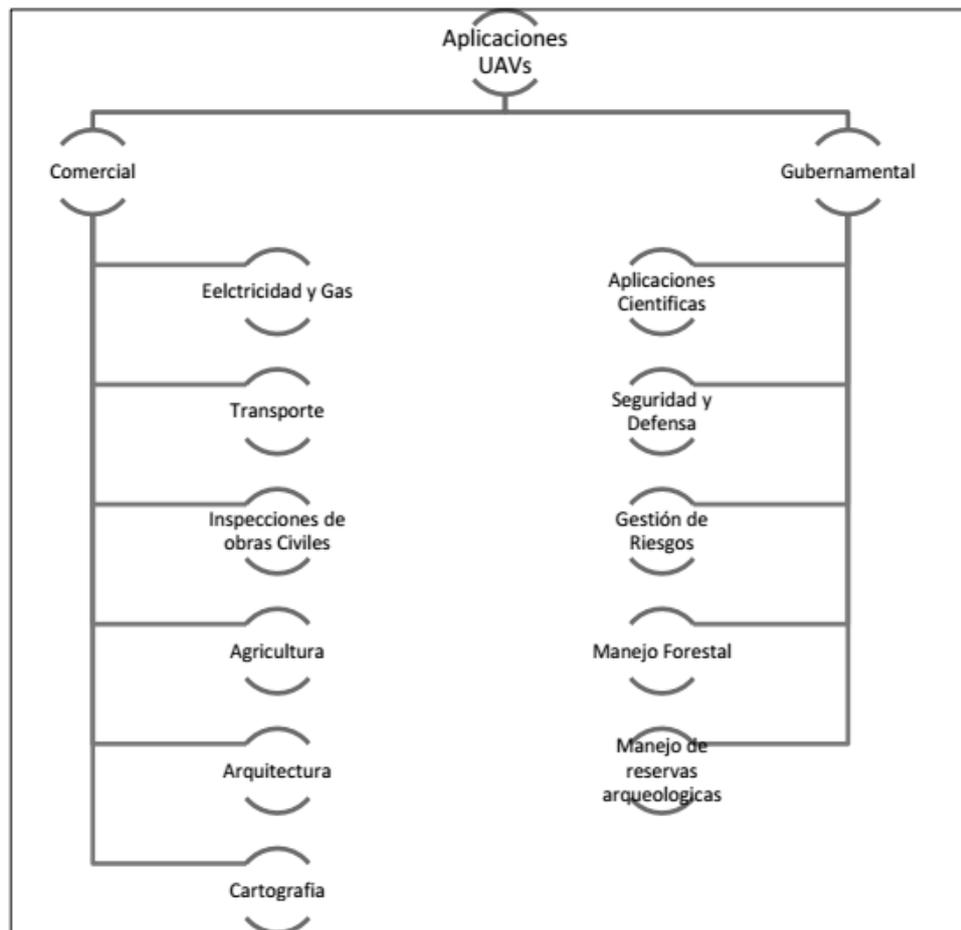


Figura 5: Aplicaciones de los UAV

Fuente: (Sani, 2015)

2.4. Materiales y equipos

2.4.1. Lente 3.97 mm (NIR Red+ NIR)

Es una lente 4K diseñada para las líneas de cámara GoPro Hero, DJI Phantom 4/3, DJI Inspire X3. Tiene 82 grados HFOV, con 16MP con un peso de 7,18 g (Ver Figura 6). Este objetivo captura el sensor de imagen entera. El filtro NDVI refleja la luz infrarroja cercana y la luz roja que es absorbida principalmente por las plantas. Mediante el post-procesamiento de las imágenes capturadas se puede aplicar un gradiente de color que muestra el contraste entre regiones de vegetación sana y no saludable. La luz infrarroja se mostrará en el canal azul de la cámara y la luz roja se mostrará en el

canal rojo, por lo que es muy fácil de separar y procesar para NDVI (PEAU, 2009).



Figura 6: Lente NIR

2.4.2. Tarjeta de calibración

Es un pack completo con tres objetivos y cada uno con su respectiva curva de calibración (ver Figura 7). Permite calibrar los píxeles de la imagen. Antes de cada vuelo se toma fotografías de todo el paquete abierto con los blancos mirando arriba (PEAU, 2009).



Figura 7: Tarjeta de calibración

2.4.3. Trimble Business Center (TBC)

Trimble Business Center es un potente software de procesamiento y ajuste de datos GNSS. Es ideal para transferir, ajustar y revisar datos de levantamientos terrestres y GNSS en cualquier formato para su posterior procesamiento. Este programa ha añadido importantes opciones de dibujo CAD, creación de superficies, cálculo de volúmenes, fotogrametría terrestre, etc., que lo hacen ser un software extremadamente completo en especial para topografía y geodesia (Trimble, 2015).

2.4.4. Agisoft PhotoScan

Software autónomo que permite realizar el proceso fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D que pueden ser utilizados en aplicaciones SIG, documentación del patrimonio cultural y producción de efectos visuales, así como para mediciones indirectas de objetos de diversas escalas. Este programa tiene mucho que ofrecer a diferentes campos gracias a sus resultados de calidad y alta precisión (AgiSoft & St Petersburg, 2014).

2.4.5. QGIS con complemento MAPPiR

Mappir es un complemento de QGIS especializado en calibrar imágenes mediante el código QR que se detectará automáticamente en cada foto. El valor de reflectancia de cada objetivo se calculará y aplicará a cada una de las imágenes para poder generar el ortomosaico. El uso de una calculadora raster / índice para el índice NDVI permite el cálculo adecuado de los valores de índice calibrados (PEAU, 2009).

2.5. Evaluación Multicriterio

El estudio mediante la técnica de evaluación multicriterio es una fase de complemento, en este caso geográfica, para la priorización, toma de decisiones y resolución de conflictos entre variables espaciales. Para la utilización de evaluación multicriterio, el primer paso es identificar el criterio de cada parámetro espacial. Cada uno puede ser representado de forma continua (como pendientes, porcentaje de humedad, etc.) o booleana (como buffer). Los parámetros continuos están desarrollados para expresar su relativa importancia en pesos de acuerdo a los objetivos de consideración. El resultado de evaluación multicriterio enfocado a variables geográficas es un

mapa de idoneidad con el mismo rango numérico que los mapas de factores estandarizados (Eastman *et al*, 1993).

2.5.1. Matriz de Saaty

Thomas Saaty, el creador de la matriz de Saaty permitió establecer la metodología de procesos de análisis jerárquico en diferentes campos de la investigación. La evaluación se permite establecer comparación entre pares de criterios cuya base es una matriz cuadrada. En cada puesto de esta matriz se establece la importancia de cada criterio respecto a demás criterios con escalas impares de 1-9 (ver Figura 8) (Martínez, 2007). Logrando un vector que permite obtener el peso de cada criterio en forma cuantitativa (Wind & Saaty, 1980).

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

Figura 8: Escalas de medidas de Saaty
Fuente: Martínez, 2007

2.6. Clasificación no supervisada

En estudios geográficos la clasificación de una imagen, ya sea tomada por medio satelital o diferentes medios, su objetivo es extraer clases de información (raster) mediante técnicas de tipo digital agrupándolas por sus valores similares (Arango, et al. 2005). El principal fin de la clasificación es el análisis temático de información geoespacial, ambiental, etc. Existen dos

diferentes maneras de clasificar una imagen: clasificación no supervisada y clasificación supervisada.

La clasificación no supervisada realiza el proceso de extracción de clases mediante un algoritmo que no requiere alimentación de información previa del analista, sino automáticamente mediante la exploración espectral de cada pixel. Este proceso se basa en diferenciar el tipo de información temática de un raster (imagen). De acuerdo al número de clases necesarias se puede utilizar distintos métodos: K-medias (clases conocidas), el método de Betchelor y Wilkins (clases desconocidas) (Macedo et al, 2010).

2.7. Índices de vegetación

La teledetección es una técnica que permite obtener información de la superficie terrestre a través de instrumentos sin estar en contacto con ella. (Schowengerdt, 2007). Tiene diferentes aplicaciones en la agricultura y sobre todo en el ámbito vegetativo. Para medir el estado fenológico de las plantas se utilizan índices de vegetación que son calculados a partir de la reflectividad de varias bandas del espectro (Escribano et al., 2015).

Los índices de vegetación, o índices verdes, son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen (Speranza & Zerda, 2002).

2.7.1. Composición

Los índices de vegetación son adimensionales e indican el vigor de la vegetación a partir de su clorofila. (Qhizhpe, 2015). Los resultados de las operaciones matemáticas de los píxeles arrojan un valor específico para cada uno indicando el nivel de vigorosidad de la vegetación. Altos valores indican una planta en buen estado.

Los índices de vegetación pueden ser cualitativos o cuantitativos y han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. Como una gran variedad de factores afecta directamente a la producción de biomasa, los índices pueden emplearse para determinar la influencia de dichos factores en una zona. Así, pueden usarse para determinar el efecto sobre la biomasa de sequías, anegamientos, incendios, desmontes, granizo, plagas, o deficiencias nutricionales. (Towers, 2002).

2.7.2. Limitaciones de los índices de vegetación

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es uno de los más utilizados y presenta algunos inconvenientes en cuanto la cubierta vegetal de la planta supera el 50%. Dando una información errónea en algunas zonas y dando resultados erróneos para la toma de decisión sobre todo en el campo de la agricultura (Speranza & Zerda, 2005).

La calibración de los sensores es factor vital para la conexión entre los disturbios atmosféricos y la sensibilidad de éste para mejor precisión. Uno de estos problemas es la iluminación porque los cambios atmosféricos no afectan a todas las longitudes de onda de la misma manera (Towers, 2002).

Cuando la cubierta vegetal es muy baja es difícil identificar la vegetación, pues existe una distorsión en las respuestas espectrales. Una forma de corregir es calculando índices corregidos por el suelo como el Índice de Vegetación Perpendicular PVI (Richardson & Wiegand, 1977), o el Índice de Vegetación Ajustado por Suelo Transformado TSAVI (Baret & Guyot, 1991). En ambos casos se estudia la llamada "línea de suelo" y se determina la distancia perpendicular desde esta línea hasta el valor total de reflectancia en rojo y NIR. Efectivamente lo que se realiza es restar la reflectancia propia del suelo del valor total de reflectancia, y se presume que la diferencia se debe a la vegetación (Towers, 2002).

2.7.3. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El NDVI es una medida que refleja la calidad cantidad y desarrollo de una planta en términos de la interacción de la radiación solar y la presencia de clorofila en las hojas de las plantas (Escribano et al., 2015) (Salazar & Poveda, 2003). Las tres bandas del espectro, verde (520-530 nm), azul (400-500 nm) y la roja (630-700 nm) muestran la cantidad de energía absorbida por las plantas. (Escribano et al., 2015). Mientras el infrarrojo cercano (720-2500 nm) es reflejada casi en su totalidad en comparación con las otras bandas.

El NDVI es definido como (Tarpley, 1994)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde NIR representa el infrarrojo cercano y red la respuesta espectral en la banda del rojo. Todos los organismos fotosintéticos contienen uno o más pigmentos que le permiten absorber la radiación visible (Salazar & Poveda, 2003).

La principal ventaja del NDVI es su fácil interpretación pues los valores varían entre -1 a 1 permitiendo conocer el estado de vigor vegetal de grandes superficies, detectando fenómenos de amplio rango de variación (Chuvieco et al, 2002).

Los valores negativos, entre -1 y 0 corresponden a cuerpos de agua, roca expuesta y, en general, a territorio desprovisto de vegetación. Valores comprendidos entre 0.1 a 0.4 corresponden a coberturas de pasto o similares. Valores cercanos a 1 corresponden a zonas boscosas (García, 2015).

Existen algunas relaciones establecidas en el valor del NDVI, por ejemplo:

- El agua tiene reflectancia $NIR > RED$ por lo tanto los valores del NDVI son negativos

- Las nubes representan valores similares para *RED* y *NIR*, por lo que su NVDI es cercano a cero.
- El suelo descubierto y con vegetación rala presenta valores positivos, aunque no muy elevados.
- La vegetación densa, húmeda y bien desarrollada presenta los mayores valores de NVDI.

La atmósfera, especialmente las nubes, influyen sobre las señales a las bandas del infrarrojo y rojo tendiendo a disminuir el valor real del NVDI.

Tener en cuenta el valor del NDVI cambia con respecto a la situación hídrica del suelo, en función del uso del suelo, el estado fenológico de la vegetación y el ambiente climático de la zona (Escribano et al., 2015).

2.8. Diseño experimental

Técnica estadística que establece la causa y efecto de un experimento mediante un conjunto de normas, procedimientos y cálculos, para obtener información con un alto grado de confiabilidad. Su objetivo es determinar la influencia de los factores que intervienen en una o más variables de interés (Badii et. al, 2007).

2.8.1. Fundamentos del diseño experimental

Es necesario comprender algunos conceptos del diseño experimental que se definen según Badii et. al, 2007 de la siguiente manera:

- **Unidad experimental (UE):** son los objetos, individuos, o intervalos de tiempo con los que se experimenta.
- **Tratamiento:** formas o técnicas que se utilizan para determinar mediante la medición el efecto de la variable respuesta.
- **Variable respuesta:** medida que produce el tratamiento a la unidad experimental

- **Bloque:** Conjunto de unidades experimentales con características homogéneas, que se forman de acuerdo a un factor.
- **Repetición:** número de veces que aparece un tratamiento en el diseño experimental
- **Aleatorización:** establecer algún tipo de tratamiento a las unidades experimentales sin ningún orden específico.

2.8.2. Tipos de diseño experimental

Los tipos de diseño más utilizados son: diseños factoriales, diseño completamente aleatorio, diseños de bloques completos e incompletos y diseño de parcelas y bloques divididos. En la Tabla 1 se muestran las características de cada uno de ellos (Badii et al., 2007).

Tabla 1.

Tipos de diseño experimental

NOMBRE	CARACTERÍSTICA	VENTAJA
Diseño Completamente al azar	En el más utilizado en el sector agrícola, en donde los tratamientos aparecen una sola vez en cada repetición.	<ol style="list-style-type: none"> 1. fácil de diseñar 2. fácil de analizar 3. diferentes números de repeticiones 4. máximo grado de libertad para el error.
Diseño de Bloques al azar	Todas las unidades experimentales con homogéneas y los tratamientos se aplican al azar.	<ol style="list-style-type: none"> 1. reduce la varianza de error 2. fácil de analizar 3. más flexibilidad 4. más precisión
Diseño de Cuadro Latino	Es un diseño de bloque en dos direcciones. Formado por filas y columnas de tal manera que los tratamientos no se repitan.	<ol style="list-style-type: none"> 1. reduce la varianza de error 2. fácil de analizar 3. más flexibilidad 4. más precisión

2.9. Agricultura de precisión

Es la aplicación de nuevas tecnologías para medir la variabilidad espacial y temporal de la vegetación, en especial de cultivos. Cuya información determina de forma puntual las necesidades de parcelas agrícolas (Saltos, 2014).

2.9.1. Características

En términos generales se puede considerar que la gestión localizada de un cultivo está definida por un ciclo de cuatro fases: (Díaz, 2015)

- **Monitorización:** control y mapeo de las variables significativas en el cultivo
- **Toma de decisiones** y elaboración del mapa de tratamientos en función del mapa obtenido de la variable de interés (fase denominada también planificación de la actuación: que aplicar, como, cuando y donde);
- **Actuación** en campo o ejecución del manejo localizado que se ha decidido;
- **Evaluación** de la rentabilidad (económica y medioambiental) de las operaciones realizadas en el cultivo para programar acciones el año siguiente.

La finalidad de todo esto es la obtención de mayores rendimientos (económicos, medioambientales, sociales...etc.) (Díaz, 2015).

2.9.2. Ventajas de la agricultura de precisión

Las ventajas de la agricultura de precisión con respecto a la tradicional son claras debido a la posibilidad de optimizar la cantidad de agroquímicos aplicados en los suelos y cultivos promoviendo así a un tipo de agricultura sostenible y amigable con el medio ambiente. Además de

una significativa reducción de los recursos energéticos, lo que seguramente aportará a la mitigación del cambio climático global (Bongiovanni, 2006).

En el ámbito económico se optimizan los recursos y costos de producción es decir la aplicación de insumos solo en las áreas en las que resulta necesario y en donde la respuesta de esta intervención tendrá un claro beneficio, mejorando de manera significativa la calidad de las cosechas (Chartuni, 2014).

2.9.3. Aplicaciones concretas en la agricultura

- Detección del estado hídrico de las plantas: gracias a la utilización de vehículos aéreos no tripulados y sensores térmicos se puede mejorar el aprovechamiento del agua. Las plantas al presentar stress hídrico tienden a cerrar sus estomas provocando un aumento de temperatura en sus hojas. Gracias a las imágenes de alta resolución se pueden observar este tipo de anomalía en el cultivo (Díaz, 2015).
- Detección del stress nutricional en cultivos: primero se determina el contenido de clorofila y la concentración de nitrógeno de las plantas para poder aplicar la cantidad exacta y tipo de fertilizante reduciendo así costos (Díaz, 2015).
- Detección temprana de enfermedades y plagas: a partir de imágenes multiespectrales permite detectar irregularidades en los cultivos producidos por la presencia de plagas y enfermedades. Como solución se pretende mapear estos procesos, así como dimensionarlos y evaluarlos de forma puntual (Díaz, 2015).
- El mapeo de plagas es una gran ventaja para el agricultor pues con la intervención correcta y a tiempo el ahorro de costos en pesticidas o plaguicidas es mucho menor. Como ejemplo están las malezas resistentes. Este es uno de los principales problemas que debe enfrentar un productor agropecuario en la actualidad, el control de

las mismas es un trabajo constante que deberá perfeccionar para no perder rentabilidad en su unidad productiva.

- Otro problema que puede ser fácil de solucionar es la identificación de árboles enfermos y especies invasoras (Díaz, 2015).
- Controles en cultivos, mediante monitorización del estado de los cultivos durante su ciclo fenológico, a partir de imágenes multiespectrales y de la captura de los datos de campo: con ello se puede evaluar los daños provocados por el tiempo atmosférico y climatológico. Los chequeos de vegetación mediante la determinación de los principales índices de calidad de un cultivo, ayuda a la toma de decisiones respecto al uso de fertilizantes (Díaz, 2015).
- Índices relativos a calidad en cultivos: mediante el mapeo agrícola y análisis de cultivos, originando información valiosa que puede tener un impacto directo en la rentabilidad, a partir de las imágenes multiespectrales obtenidas desde un UAV en combinación con parámetros medidos en campo (Díaz, 2015).
- Información agrometeorológica en tiempo real: generando mapas con la distribución de las principales variables meteorológicas, como temperatura, humedad, precipitación, insolación, etc. (Díaz, 2015).

2.10. Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*)

El Kikuyo cuyo nombre científico es *Pennisetum clandestinum* tiene su origen en África y crece de forma espontánea en las regiones andinas de Ecuador y Colombia. Están adaptadas mejor al frío a una altitud entre los 1800 y 3200 m.s.n.m. (Hernández, 2004).

El contenido promedio de proteína cruda de esta gramínea es aproximadamente del 14%, y la digestibilidad in vitro promedio de la materia seca es de un 66%, siendo por lo tanto una de las gramíneas con mayor

porcentaje. La producción diaria de pasto kikuyo es de 40 kg de MS/ha sin fertilización (Lobo, 2001).

2.10.1. Clasificación taxonómica

La identificación taxonómica está clasificada de la siguiente manera según varios autores y se puede ver una diferencia entre ellos (ver Tabla 2).

Tabla 2.

Clasificación taxonómica del kikuyo

Clasificación	Osorio & Roldán (2006)	Rueda (2002)
Reino	Vegetal	Plantae
Clase	Angiosperma	Liliopsida
Subclase	Monocotiledónea	
Familia	Gramínea	Poaceae
Género	<i>Pennisetum</i>	<i>Pennisetum</i>
Especie	<i>clandestinum</i>	<i>clandestinum</i>
Nombre común	Kikuyo	Kikuyo

Fuente: (Osorio & Roldán, 2006) (Rueda, 2002)

2.10.2. Características botánicas

Es una planta perenne rastrera que se apoya en los arbustos para su fácil y rápido crecimiento. Este pasto es rizomatoso, forma una masa de follaje baja y compacta. Los rizomas hasta de cinco metros de largo, llevan dos clases de tallos: estériles, de entrenudos cortos y hojas largas, y fértiles, las inflorescencias crecen en las axilas de las hojas. Las espiguillas tienen dos flores: una inferior y estéril, la superior fértil, en la cual se destacan los filamentos de los estambres, que miden hasta cinco centímetros de largo y sobresalen del follaje (León, 2000).

Las hojas son glabras o con pelos. Vainas esparcidamente vilosas en el envés a glabras, con márgenes membranosos y secos; lígula en forma de anillo de pelos de 1–2 mm de longitud, láminas foliares planas o con duplicadas (dobladas a lo largo de su nervio medio), con el ápice obtuso, de 1.5 a 9 cm de longitud, de 2 a 5 mm de ancho, glabras o esparcidamente vilosas en la base (Vibrans, 2009).

No exige en cuanto a la humedad, siempre y cuando la precipitación pluvial supere los 1000 mm anuales. Sus raíces pueden alcanzar los 2 m de longitud lo que le permite extraer agua del suelo con facilidad. Prefiere los suelos de textura liviana, buen drenaje, y alta fertilidad (Lobo, 2001).

2.10.3. Manejo

El adecuado manejo del kikuyo consiste en el pastoreo rotacional cada 40 – 80 días, de 5 a 10 cortes por año, cantidad de agua y fertilizante correcto (Hernández, 2004).

2.10.4. Composición química del kikuyo en base seca

El kikuyo presenta según la Tabla 3 el siguiente valor nutricional de acuerdo a su estado de crecimiento

Tabla 3.

Composición química del kikuyo en base seca

Mezcla	Estado de crecimiento	Materia seca %	Proteína %	Fibra%	Ca %	P %
Kikuyo (20 cm)	Estado vegetativo	19.1	17.5	4.9	0.25	0.3
Kikuyo	Tercera semana	-----	19.9	0.1	-----	----
Kikuyo más trébol rojo	Tercera semana	-----	-----	1.1	29.0	----

Fuente: (Osorio & Roldán, 2006)

2.11. Rye grass

Es una gramínea de rápido crecimiento que se encuentra entre los 2400 y 3200 m s.n.m., con una temperatura que oscila entre los 12° a 18 °C; este tipo de cultivo requiere suelos francos a franco arcillosos, con fertilidad media a alta, que posean drenajes apropiados, con un pH de 6,6 a 7,3 (INIAP, 2015). Presenta dos variedades: perenne (*Lolium perenne*) y anual (*Lolium multiflorum*) cuya diferencia radica en el tiempo de duración pues el perenne es constante mientras que el anual dura cada año.

La plantación de Rye grass crece rápidamente cuya ventaja es su alta capacidad de adaptación a todo tipo de suelo y tiene elevados rendimientos para la ganadería (Castellanos, 2009).

Es la mejor elección forrajera debido a su rápida germinación para crecer y desarrollarse además de sus elevados rendimientos, calidad nutritiva y alta resistencia al pisoteo (Castellanos, 2009; Cuichan & Euclides, 2015); al realizar el corte de pasto se recomienda efectuarlo de 2 a 4 cm del suelo (Cobos & Narváez, 2017).

2.11.1. Características botánicas

El Rye grass es un cultivo que crece en matas espesas de baja a mediana estatura con tallos lisos de hasta 1,3 cm. Su sistema radicular permite la captación de agua a nivel superficial. El crecimiento de la planta inicia entre los 8 y 15 días de la siembra. Finalmente, en la fase de floración la planta puede llegar a medir hasta 20 cm (Olate, 2010).

2.11.2. Clasificación Taxonómica

La clasificación taxonómica del Rye grass se presenta en la Tabla 4

Tabla 4.*Clasificación Científica del Rye Grass*

Reino	Plantae
Subreino	<i>Trachebionta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Liliopsida</i>
Subclase	<i>Commelindiae</i>
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Subfamilia	Pooideae
Tribu	Poeae
Género	<i>Lolium L</i>

Fuente: (Olate, 2010)

2.12. Variables físicas del suelo

Uno de los factores que influyen en el suelo, son las variables físicas porque representan su forma y dimensión, así como las características externas del terreno, que influye en la productividad de cualquier cultivo (Jaramillo *et al.*, 2011). En la Tabla 5 se representan estas variables físicas.

Tabla 5.*Variables físicas del terreno*

Variable	Definición
Pendiente	Se define como el ángulo que existe entre el vector normal y la superficie en ese punto y la vertical (Felicísimo, 1994).
Orientación	Permite identificar la orientación de la pendiente e identificar zonas con mayor o menor iluminación solar (Areizaga C, 2010).
Luminosidad	Se define la insolación potencial en un punto como el tiempo máximo que ese lugar puede estar sometido a la radiación solar directa en ausencia de nubosidad (Felicísimo, 1994).

2.13. Modelos digitales

2.13.1. Modelo Digital del Terreno (MDT)

Un modelo digital del terreno (MDT) es una representación digital elemental de la superficie cuya estructura es numérica o raster (variables cuantitativas). Representa una distribución espacial derivada de una capa de elevaciones. Los MDT cuya base es una variable de distribución espacial cuantitativa debe ser siempre continua, además toman forma de estructura de datos que indica que su construcción es realizada de forma interna (Felicísimo, 1994).

2.13.2. Modelo Digital de Superficie (MDS)

El Modelo digital de superficie (MDS) se deriva de un MDT y a diferencia de éste, el MDS posee datos con información de elevaciones que incluyen la vegetación, características antropológicas como pueden ser las construcciones en el terreno. Son datos ininterrumpidos, importantes para un análisis geoespacial más avanzado y preciso de la realidad. El MDS es importante en el análisis de variables transfronterizas como por ejemplo la aplicación en líneas de visión, telecomunicaciones y silvicultura (Kettle et al., 1999).

2.14. Álgebra de mapas

Es una técnica que permite manipular datos geográficos de tipo raster. Esta metodología consiste en aplicar fórmulas a cada valor del píxel y realizar operaciones espaciales como por ejemplo la interpolación de datos, el filtrado espacial, derivación de la topología superficial, y la visión desde puntos, sombras en el relieve e irradiancia, entre otras (Barbosa, 1997).

2.15. Biomasa

Cantidad de materia acumulada que tiene un individuo expresada en peso por unidad de área o de volumen. Puede estimarse usando métodos físicos (Stockle *et al.*, 2003). Sin embargo, en la actualidad una alternativa para optimizar recursos para cálculo de biomasa es la utilización de sensores remotos e índices de vegetación que complementan su estudio (Pascual *et al.*, 2012).

2.16. Correlación

Cuantificar la intensidad de la relación de dos variables. El parámetro que nos da tal cuantificación es el coeficiente de correlación lineal de Pearson r , cuyo valor oscila entre -1 y $+1$. Mientras que el coeficiente de determinación r^2 explica la relación con una o más variables predictorias. El R^2 siempre se encuentra entre 0 y 1. Por lo general, si el R^2 es mayor, mejor será el ajuste del modelo a sus datos (Vila *et al.*, 2004). En la Tabla 6 se muestra los tipos de correlación en base al valor resultante.

Tabla 6.

Tipos de correlación

Tipo de correlación	R^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
Correlación negativa o indirecta perfecta	$<0,3$

Fuente: (Díaz, 2015)

2.17. Fundamentación Legal

La temática de seguridad alimentaria apegada a la investigación se fundamenta en una base legal, existente tanto mundial como nacional,

desde los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) hasta la actual Constitución de la República del Ecuador.

El segundo Objetivo de Desarrollo Sostenible afirma: *“Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible”* (Naciones Unidas, 2015). Garantizar la alimentación y buena nutrición siempre ha sido de importancia para cada gobierno. El Ecuador se sustenta en la Constitución del 2008 con el Artículo 281 *“La soberanía alimentaria constituye un objetivo estratégico y una obligación del Estado para garantizar que las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades alcancen la autosuficiencia de alimentos sanos y culturalmente apropiados de forma permanente”*. Además, la Ley Orgánica de Soberanía Alimentaria como muestra en el artículo 1 su finalidad es: *“...fomentar la producción suficiente y la adecuada conservación, intercambio, transformación, comercialización y consumo de alimentos sanos, nutritivos...”*

El gobierno actual a través de la Secretaría Nacional de Planificación Y Desarrollo (SENPLADES) implementó el Plan Nacional del Buen Vivir cuyo periodo va desde el 2017 hasta el 2021. El objetivo 5 impulsa la productividad y competitividad para el crecimiento económico sostenible de manera redistributiva y solidaria. Su política 5.6 establece: *“Promover la investigación, la formación, la capacitación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, la innovación y el emprendimiento, la protección de la propiedad intelectual, para impulsar el cambio de la matriz productiva mediante la vinculación entre el sector público, productivo y las universidades”*

El presente proyecto se apoya en los lineamientos legales, pues la implementación de nuevas tecnologías para la eficiencia en la producción de pasto crea un ciclo de mejoramiento continuo en la parte agropecuaria y los productos derivados del ganado vacuno.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. GENERALIDADES

La metodología del proyecto está compuesta por tres fases (Figura 9):

1. Caracterización de la zona de estudio
2. Obtención y procesamiento de imágenes aéreas.
3. Generación y correlación de índices EMC, NDVI y Biomasa

En el primer proceso se llevó a cabo el levantamiento de datos físicos del terreno (pendiente, luminosidad, orientación) y la caracterización de la zona de estudio (análisis de suelo: Calcio, Hierro y Fósforo). En la segunda se obtuvieron imágenes aéreas tanto en RGB como en infrarrojo mediante el uso de UAV en las diferentes etapas del crecimiento del pasto. Finalmente, en la tercera fase se utilizó la metodología de evaluación multicriterio para la ponderación de las variables físicas que intervinieron en el estudio. Para el cálculo de volúmenes en las parcelas se usaron modelos digitales de terreno y de superficie, así como la toma de muestras en campo de biomasa vegetal. El cálculo del índice de NDVI se realizó tras la calibración del ortomosaico generado y mediante un álgebra de bandas se pudo obtener valores de NDVI correspondientes a cada parcela. A continuación, se realizó una clasificación no supervisada para determinar el porcentaje de crecimiento y para finalizar se generó una correlación entre estos índices y la biomasa. Adicional a esto, se elaboraron mapas que permitieron identificar las zonas óptimas del cultivo de pasto según cada índice (ver Figura 9).

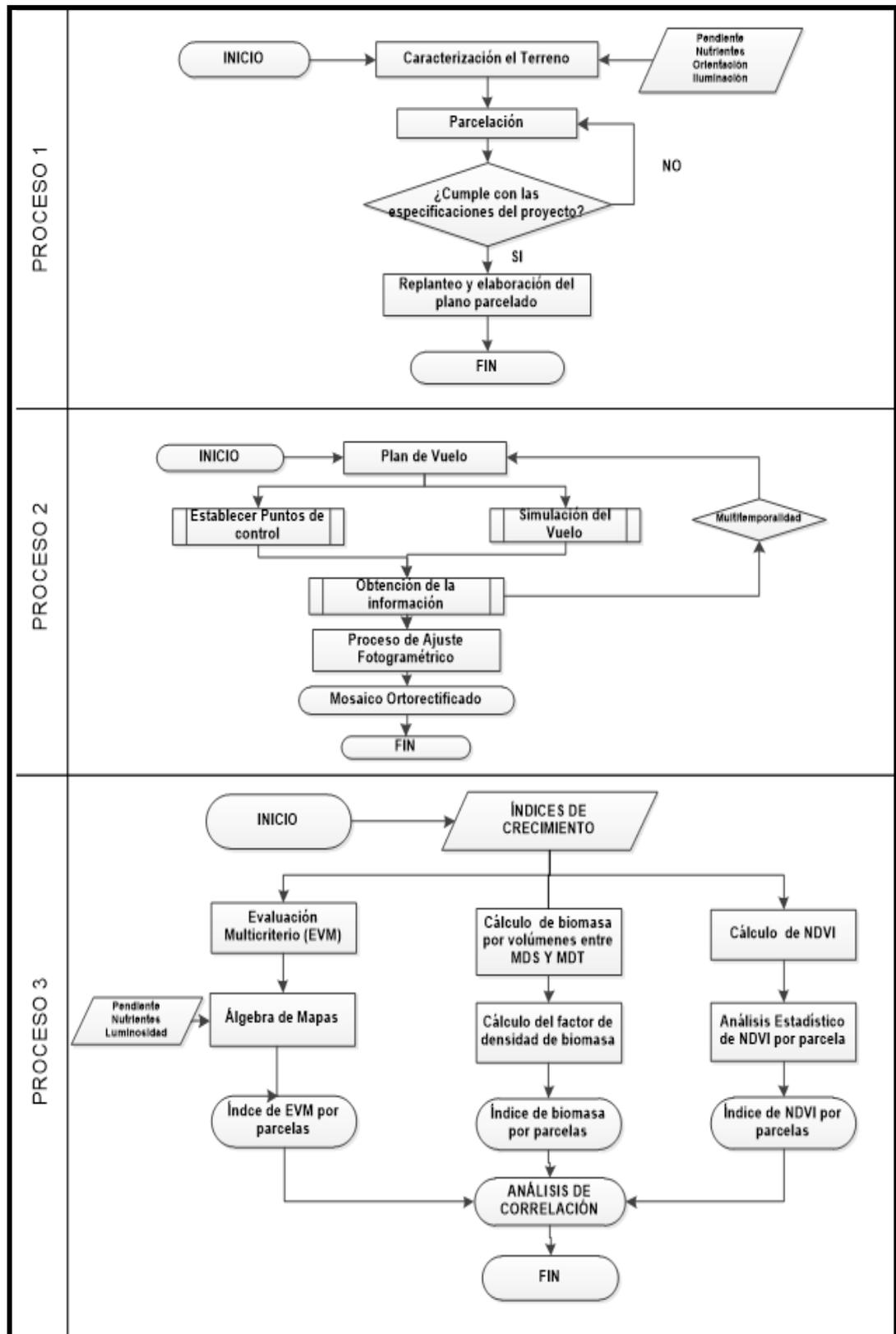


Figura 9: Metodología del proyecto

3.2. Caracterización de la zona de estudio

Mediante una caracterización del terreno se obtuvieron variables que representan las condiciones físicas del terreno. El levantamiento topográfico como se ve en la Figura 10 permitió conseguir datos limítrofes de la zona de estudio, además de información altimétrica. El instrumento utilizado fue una estación total marca SOKKIA SCT-6 con precisión de 3" y con un alcance en distancia de 400 m.



Figura 10: Trabajo en campo

3.2.1. Parcelación

La zona de estudio cuenta con una superficie de 8.335 metros cuadrados. Para el trabajo de investigación se definieron un total de 11 parcelas según la topografía del terreno. Con el criterio de profesionales en el campo de la investigación relacionada a la agricultura (paisaje y topografía del terreno), se dividió el terreno en 77 unidades experimentales. El área estándar fue de 75 metros cuadrados para cada una. Mediante el insumo de datos obtenidos en el levantamiento topográfico (límites), se procedió a materializar las parcelas previamente elaboradas en gabinete a través del replanteo. Sin

embargo, se excluyó una zona, en donde es difícil el cultivo de pasto por las condiciones del suelo (Figura 11).



Figura 11: Zona de estudio

3.2.2. Pendiente

La forma de calcular la pendiente fue la toma de puntos transversal y lateralmente de todo el terreno cada diez metros mediante métodos topográficos. Sin embargo, en zonas con desniveles notables la densidad de puntos tomados aumentó. Una vez terminado el levantamiento se descargaron los datos de la estación total. Con el software ArcGis primero se importaron los puntos para realizar una red de triángulos irregulares (TIN) y posteriormente convertirlos a raster obteniendo el modelo digital del terreno (MDT) para calcular la pendiente. Al final se elaboró un mapa de pendientes representado por porcentaje (Figura 12).

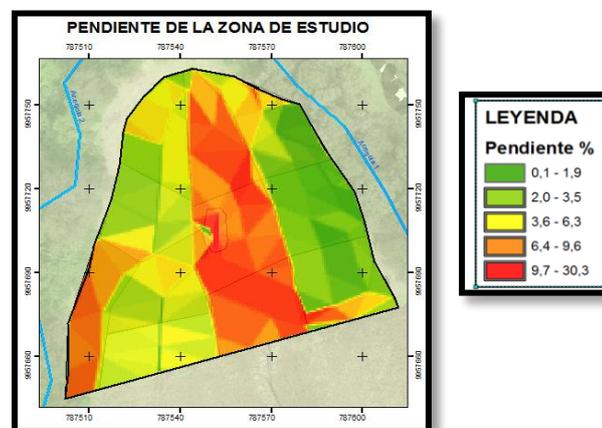


Figura 12: Porcentaje de pendientes

3.2.3. Luminosidad

La luminosidad es una variable importante que representa la cantidad de energía solar por metro cuadrado que recibe cada parcela. El software ArcGis trabaja con información básica y parámetros opcionales (Figura 13). Estos tres son indispensables: el sistema de proyección, el modelo de elevación y el tiempo de iluminación.

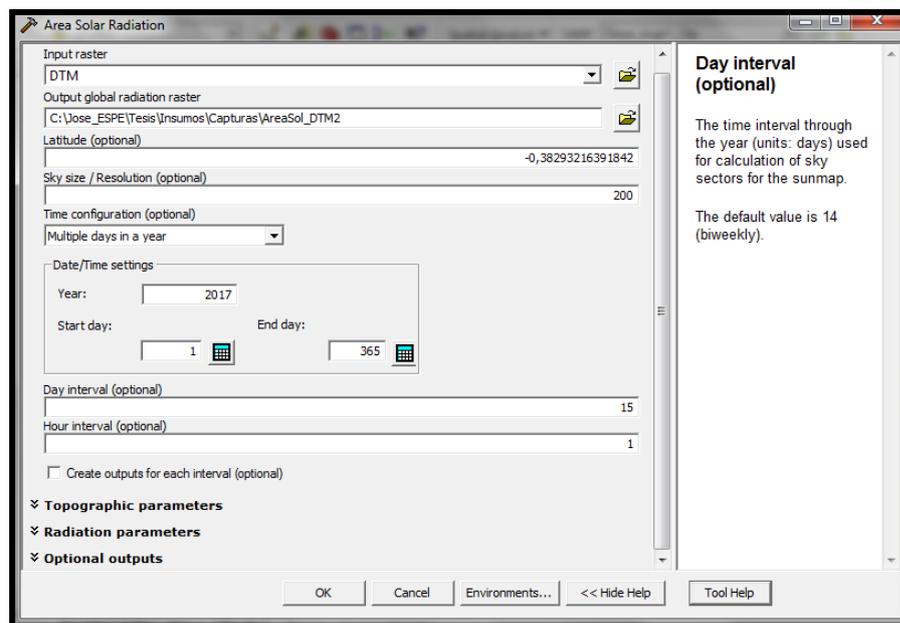


Figura 13: Área de radiación solar en ArcGis

Uno de los requisitos para realizar la estimación de radiación solar es establecer un sistema de proyección que permita identificar la latitud en que se encuentra el área de estudio y el software se encarga de determinar la declinación y posición solar. El modelo de elevación generado con las curvas de nivel obtenidas anteriormente es el siguiente insumo que fue necesario para realizar el análisis de esta variable (Desktop, 2016). Se realizó el promedio de los datos durante un año con intervalos de 14 días y de cada hora. Finalmente se obtuvieron resultados de luminosidad en el terreno medidos en kilovatio por metro cuadrado (Figura 14).

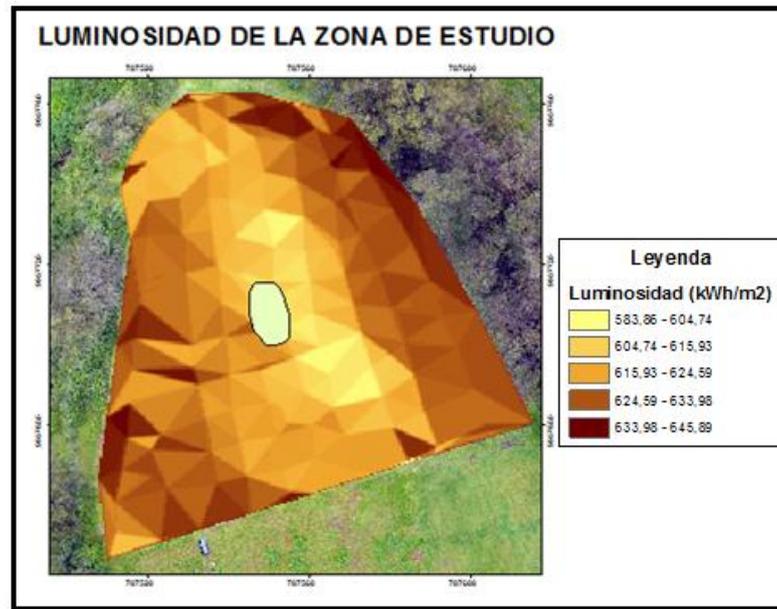


Figura 14: Radiación solar por metro cuadrado

3.2.4. Orientación

La orientación se entiende como dirección de la pendiente, representa por Norte, Sur, Este y Oeste. El algoritmo utilizado en el software para cálculo de orientación se basa en la toma de una celda muestral y 8 celdas vecinas del raster. Para convertirlas en dirección de brújula cada celda del raster consta con un valor de 0 a 360 grados en direcciones de las manecillas del reloj, y valores de -1 para la representación de zonas planas o sin dirección (Desktop, 2016). Las diferentes orientaciones en las parcelas pueden ser observadas en la Figura 15. En las parcelas de estudio se analizaron principalmente las direcciones oeste y este, pues la zona de estudio ubicada en el valle de los chillos posee un clima influenciado por el volcán Cotopaxi. La dirección predominante del viento en la zona de influencia es en sentido Este (IG & IRD, 2005).

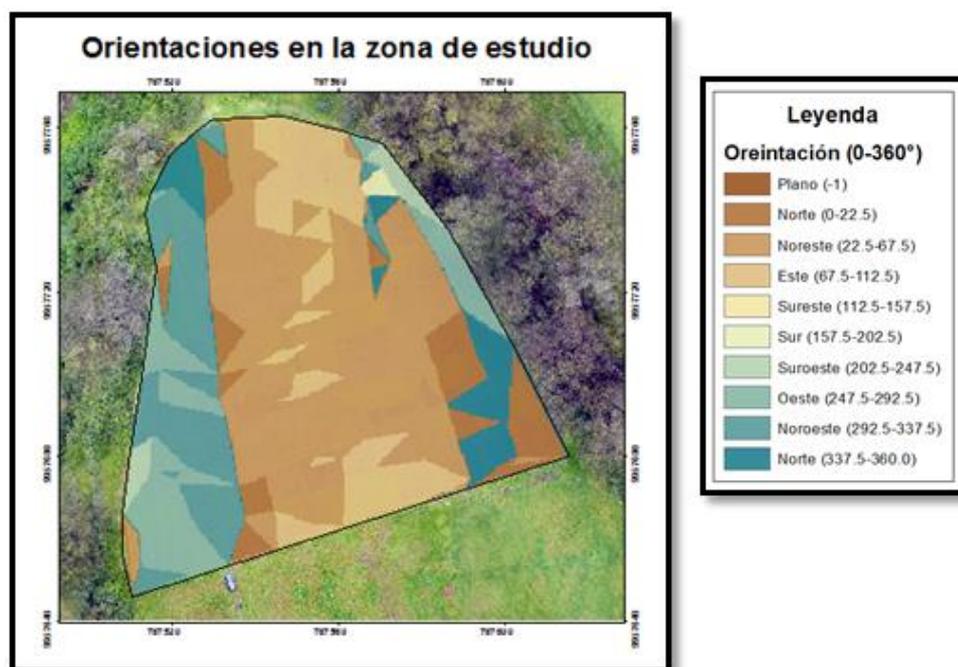


Figura 15. Orientaciones.

3.2.5. Muestreo y análisis del Suelo

Para contar con un análisis a nivel de nutrientes en el suelo (P, Fe, Ca) se realizó un muestreo aleatorio sistemático en zigzag en función de la topografía del terreno (Bianchini, 2012). Mediante el mapa de pendientes se determinaron 4 zonas con una variación notable en su topografía (Ver Figura 16a). Una vez delimitadas estas zonas, se procedió a realizar una división del terreno en áreas iguales, obteniendo un total de 11 parcelas muestrales.

En cada una de estas parcelas y abarcando toda el área, se tomó un total de 10 sub-muestras que finalmente fueron homogenizadas para obtener un 1 kg de muestra compuesta (11 muestras en total) que a posteriori se enviaron al laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Los resultados del análisis del suelo se pueden ver en la Figura 16 b.

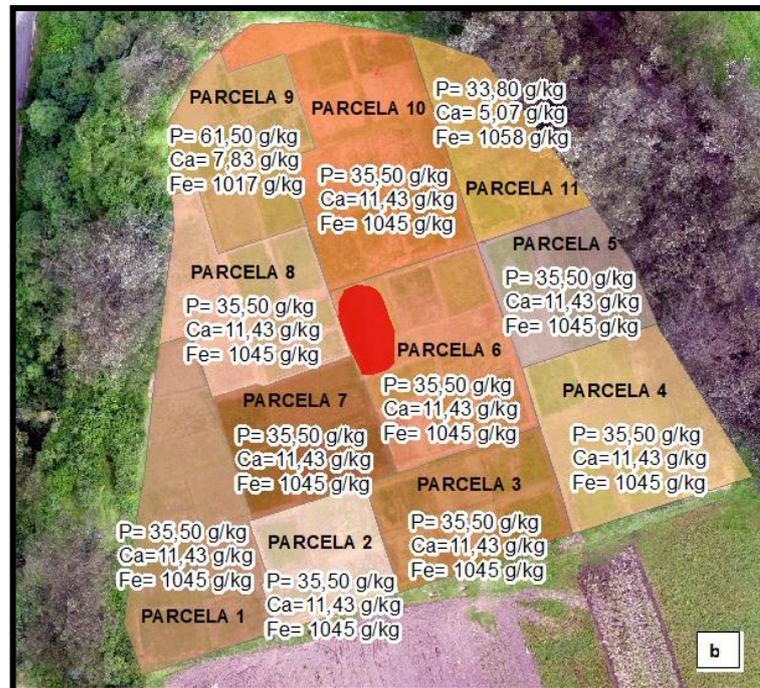
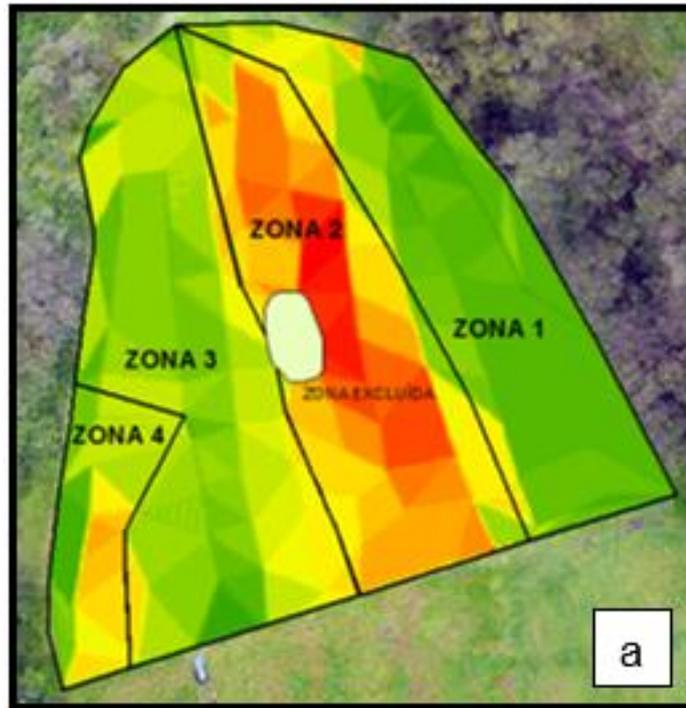


Figura 16: a.- 4 Zonas según topografía,
b.- Resultados muestras de suelo

3.2.6. Tratamientos

A cada unidad experimental se aplicó un tratamiento, ya sea con o sin fertilización y con cultivos de kikuyo, rye grass anual o rye grass perenne como se observa en la Figura 17. Según el análisis de suelo se aplicó una fertilización compuesta (10-30-10) ideal para cultivos de ciclo corto que además ayudará al desarrollo y crecimiento de la planta (Ñústez et. al, 2006).

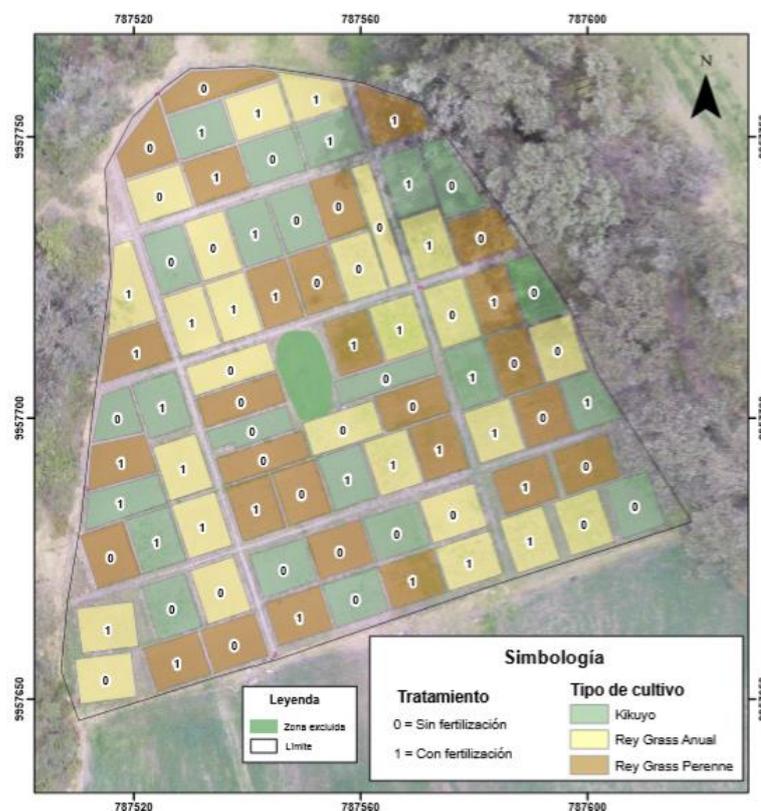


Figura 17: Tratamientos a los cultivos de pasto

3.3. Obtención de imágenes aéreas

3.3.1. Plan de vuelo

En el plan de vuelo se preparan las especificaciones técnicas para efectuar el vuelo con toda seguridad. Las variables a tener en cuenta son: los traslajos longitudinales y transversales, altura de vuelo, tiempo de vuelo, número de imágenes, así como el tamaño de píxel en la imagen (GSD). En

la Tabla 7 están los parámetros de los vuelos realizados con la cámara RGB y el NIR respectivamente.

Tabla 7.

Parámetros de vuelo

Parámetros	RGB			NIR	
	Primer vuelo	Segundo Vuelo	Tercer vuelo	Primer vuelo	Segundo Vuelo
Altura de vuelo (m)	70	70	70	70	70
Traslapo Longitudinal	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %
Traslapo Transversal	70 %	70 %	70 %	70 %	70 %
GSD (cm/pixel)	3,06	3,05	3,06	3,06	3,05
Tiempo de vuelo (min)	9	7	7	5	7
N° de imágenes	110	97	86	74	98

3.3.2. Puntos de control

Para realizar un control plani-altimétrico adecuado, primero se materializaron los puntos de control con mojones cilíndricos de cemento de diámetro 20 cm. Fueron un total de 8 distribuidos en toda el área de estudio como se observa en la Figura 18. Se obtuvieron las coordenadas de alta precisión de los puntos mediante el método de rastreo estático con el equipo GPS de precisión *Trimble R8* y un tiempo de observación para cada punto de una hora y media aproximadamente. Para mayor detalle en el anexo 1 se encuentra el reporte de los puntos de control.

Por último, para referenciar las mediciones se utilizó como línea base la estación EPEC perteneciente a la infraestructura de monitoreo continuo del Ecuador (REGME) y estableciendo el marco de referencia SIRGAS ECUADOR. Los puntos se rastrearon el 7 de septiembre del 2017

correspondiente a la semana GPS 1963, día 237. El post proceso se lo realizó en el software *Trimble Business Center*.

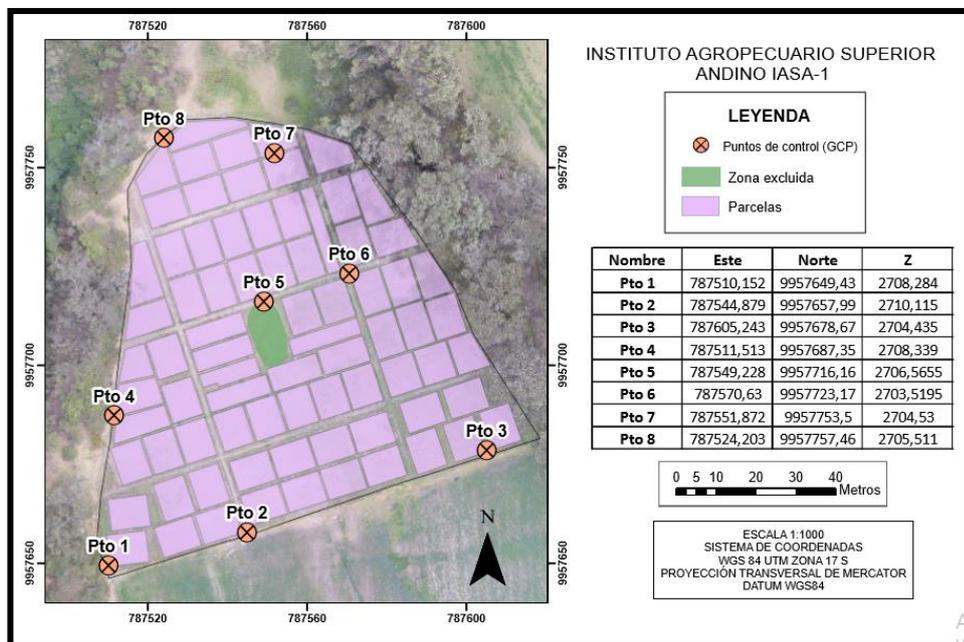


Figura 18: Distribución de los puntos de control

3.3.3. Nivelación geométrica

Para el ajuste de la altura en los modelos digitales se procedió a nivelar geoméricamente la red materializada con los bloques cilíndricos de hormigón. Esta red cuenta con un total de 8 mojones materializados previamente ya establecidos como puntos de control. Para el punto de referencia se utilizó un punto inicial base (punto 2) de los 8 puntos previamente medidos (Figura 19).



Figura 19: Punto 2- base inicial de red de nivelación

Mediante nivelación geométrica (Figura 20) y con la nivelación de ida y vuelta se generó las siguientes alturas de los 8 puntos de control preestablecidos en la Tabla 8. En el anexo 2 se encuentra los cálculos de la nivelación.

Tabla 8.

Altura de puntos de nivelación

Punto	Altura (metros)
1	2708,309
2	2710,115
3	2704,501
4	2707,878
5	2706,613
6	2703,572
7	2704,019
8	2705,496



Figura 20: Nivelación Geométrica

3.3.4. Vuelo

El vuelo se llevó a cabo con el apoyo de la aplicación Pix4D Capture compatible con dispositivos móviles. Es útil para visualizar y delimitar el área de estudio, además de generar una cobertura total de las líneas de vuelo del dron, estableciendo los parámetros de vuelo bases, para el posterior

procesado fotogramétrico de las imágenes tomadas por el drone DJI Phantom 4 (Ver Figura 21).



Figura 21: Líneas de Vuelo en Pix4D Capture

3.3.5. Procesamiento de datos

- Cámara RGB

Para realizar el procesado fotogramétrico digital de las imágenes se utilizó el software Agisoft PhotoScan, que genera datos espaciales y modelos en 3D a partir de fotografías tomadas por un RPAS (AgiSoft & St Petersburg, 2014). En primer lugar, se realizó el proceso automático de orientación de fotos para la creación de la nube de puntos dispersos. En la Figura 22 se muestra el aspecto de la interfaz a la hora de realizar el ingreso y marcado de los Puntos de control (GCPs), con ello se logra obtener una nube de puntos densa y generar el modelo digital de elevaciones (MDE), así como el ortomosaico.

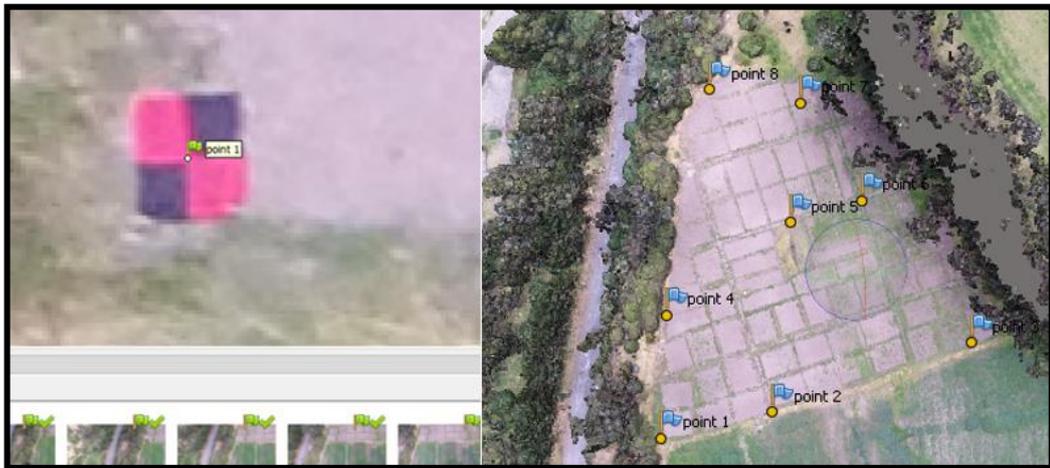


Figura 22: Ajuste fotogramétrico con los puntos de control

Se generó un reporte tras la realización de todo el procesado (anexo 3). Finalmente se exportó el Modelo Digital de Elevación y el ortomosaico. Para la aplicación del método propuesto por Robles, et al. para la estimación de biomasa, es necesario obtener dos MDE: el primero en la época inicial con el terreno sin vegetación (MDT) y otro con la superficie de la vegetación en la etapa de corte del pasto (MDS).

- Cámara NIR

Una vez generado el ortomosaico infrarrojo en el software Agisoft PhotoScan, tal como se expresa en el punto anterior, se procede a realizar la calibración mediante una tarjeta con código QR (ver Figura 23) que permite leer los valores de reflectancia de la vegetación para realizar el índice NDVI.



Figura 23: Código QR

Este procedimiento se realiza mediante el software QGIS y con la utilización del complemento MAPIR. Primero se selecciona el código seguido del directorio en donde se encuentra el insumo a calibrar (ver Figura 24).

Finalmente se obtiene el ortomosaico calibrado para calcular el NDVI. En el anexo 4 se encuentra explicado con mayor detalle la metodología.

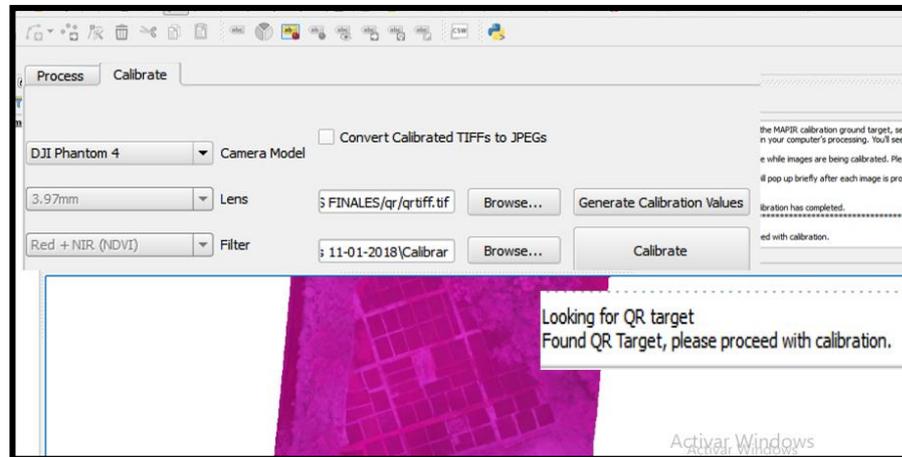


Figura 24: Calibración de las imágenes

3.4. Generación de índices de crecimiento

3.4.1. Especificaciones previas al estudio

- Temporalidad

En este estudio se realizó la siembra del cultivo y se hizo un seguimiento al desarrollo del pasto de tres especies forrajeras: kikuyo, *Rye grass anual* y *Rye grass perenne*. Cada una de ellas con morfología visual diferente. El tiempo óptimo de crecimiento varía de acuerdo a la especie de pasto, para el kikuyo su tiempo máximo de crecimiento oscila entre 40 a 80 días después de la siembra (Hernández, 1993). Para el *rye grass perenne* y *rye grass anual* es de 60 a 80 días (Villalobos & Sánchez, 2010). Con estos datos se dispuso el tiempo de 60 días para identificar el crecimiento máximo de los tres tipos de pasto.

- Exclusión de parcelas

En los modelos digitales de superficie final, es decir a los 60 días de crecimiento fue necesaria la exclusión de parcelas por motivos de logística. De las 77 parcelas, 8 se encontraban en una zona de sombra afectada por árboles. En los modelos se observó un cubrimiento parcial o completo de las

parcelas. Además, se excluyeron parcelas experimentales (15) donde no hubo brote de pasto suficiente para el cálculo de volumen y NDVI, resultando como parcelas aceptables un total de 54.

3.4.2. Índices por evaluación multicriterio

- **Normalización de las variables físicas del terreno**

Para elaborar el índice de las características físicas del terreno mediante evaluación multicriterio, fue necesario normalizar las variables físicas (pendiente, luminosidad y orientación) para homogenizarlas de modo que todas se hallen en un mismo rango de valores (habitualmente un rango de 0-1) (Tabla 9). El procedimiento de normalización de las variables se llevó a cabo dependiendo la naturaleza de cada una de ellas; la pendiente es una normalización inversa ya que, a mayor pendiente menor índice, a diferencia de las variables luminosidad y orientación.

Tabla 9.

Normalización de Variables

Variables	Fórmula
<p>Pendiente</p> <p>Observación: Para esta variable se aplica la inversa del resultado, es decir, pendientes altas representan menor crecimiento.</p>	$\hat{I}_{Pendiente} = 1 - \frac{x_{ij} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$ <p>X_{ij} = Raster Pendiente X_{min} = 0,079 % X_{max} = 21,215 %</p>
<p>Luminosidad</p> <p>Observación: Índice de variable directa, mayor luminosidad indica mejor rendimiento en el crecimiento.</p>	$\hat{I}_{Luminosidad} = \frac{x_{ij} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$ <p>X_{ij} = Raster Luminosidad X_{min} = 553864,5 (WH/m²) X_{max} = 645890,9 (WH/m²)</p>

Continúa ⇒

Orientación

Observación: Índice de la variable depende de la dirección del viento. La dirección del viento es SE. Siendo las parcelas orientadas al NO las más beneficiadas.

Reclasificación de valores de acuerdo a fuente existente. NO=1, SE=0. De acuerdo a esto se asignaron valores a las demás orientaciones en las parcelas: S=E=0,25; N=O=0,75; NE=SO=0,5.

- **Método proceso analítico jerárquico de Saaty**

Para disminuir el grado de subjetividad a la hora de asignar pesos a las variables que intervienen en el crecimiento del pasto, fue necesario utilizar la matriz propuesta por Saaty. Esto se llevó a cabo mediante la comparación entre variables y la asignación de valores entre el 1 y el 10 de la forma que se expresa en la Tabla 10. Se estableció el grado de importancia de las tres variables pendiente, luminosidad y orientación.

Tabla 10.

Escala de Saaty

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	Fuertemente más importante un elemento que otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la de otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica.
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.

Fuente: Martinez, 2007

Este proceso tuvo como resultado una ponderación que fue capaz de identificar, analizar y describir la relativa importancia de las variables que intervienen en el crecimiento del pasto. Mediante la comparación de estas variables y según los criterios de la matriz cuadrada de Saaty se logró disminuir la subjetividad respecto a las decisiones de cada peso de variables (Ramírez, 2004). La Tabla 11 permite observar los pesos de las variables de acuerdo a criterios profesionales en el ámbito de la agricultura.

Tabla 11.

Pesos de las variables

	Pendiente	Luminosidad	Orientación	P	L	O	Pesos
Pendiente	1	5	3	0,654	0,806	0,333	0,6
Luminosidad	0,2	1	5	0,131	0,161	0,556	0,28
Orientación	0,33	0,2	1	0,216	0,032	0,111	0,12
	1,53	6,2	9	1	1	1	1

- **Cálculo de Índices**

Para el cálculo de índices, se tomó como insumo base los raster de las variables (Figura 25).

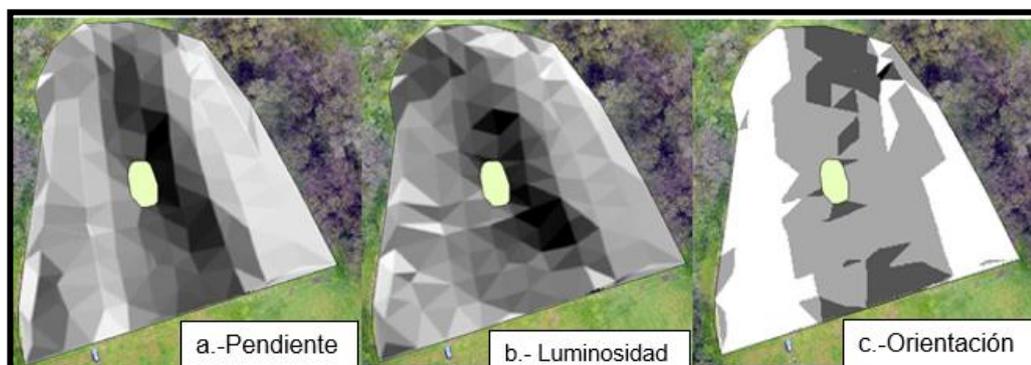


Figura 25: Raster de índices de variables.

A continuación, se presenta la fórmula (1) que se utilizó para generar el índice total para cada parcela, en donde cada variable está representada por el peso que se calculó en la matriz de Saaty.

$$\text{Índice} = \frac{(0,60 * v.\text{pendiente} + 0,28 * v.\text{luminosidad} + 0,12 * v.\text{oreintación})}{3} \quad (1)$$

El archivo raster final está representado por las parcelas con el valor que resulta del índice de crecimiento de pasto referido al estudio de las tres variables físicas utilizadas: pendiente, orientación y luminosidad empleando un algebra de mapas con la ecuación propuesta anteriormente.

3.4.3. Índice de vegetación diferenciada normalizada (NDVI)

El crecimiento del pasto no se generó de manera uniforme, por lo cual se aplicó una clasificación no supervisada a cada unidad experimental para no tomar en cuenta los valores de suelo desnudo que pueden influenciar en el cálculo del NDVI y así evitar errores. Mediante el software Erdas, se logró clasificar la vegetación en crecimiento de la imagen original (con sus diferentes tipos de vigorosidad) y suelo desnudo. Para este procedimiento se definieron 7 clases tomando en cuenta el valor cero. Automáticamente se comparó por reiteraciones el valor espectral de cada pixel. El software logró agruparlos por similitud (ver Figura 26). Esta metodología es útil en la investigación porque el análisis se centra en la interpretación de resultados sin la necesidad de muestras del cultivo tomando como insumo base el ortomosaico en RBG.

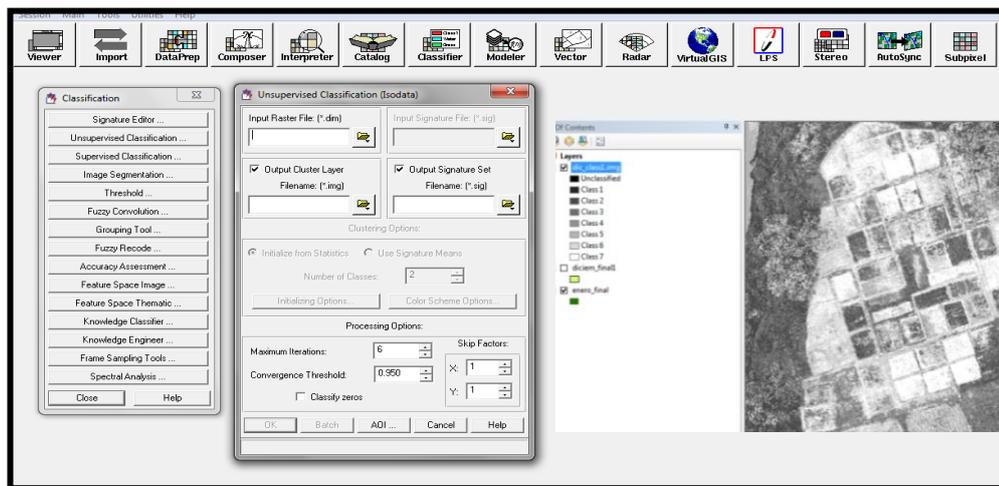


Figura 26: Clasificación no supervisada de 7 clases del modelo RGB

El modelo clasificado, se agrupó en clases de acuerdo al interés de este apartado, identificando solo vegetación arbustiva baja y discriminando suelo desnudo. Mediante un mayor número de clases se distingue con facilidad las que se van a excluir para el cálculo de los índices. En la Figura 27 se puede apreciar la reclasificación sujeta a las condiciones de discriminación mencionadas anteriormente. Las agrupaciones del 1 al 4 representan el pasto crecido.

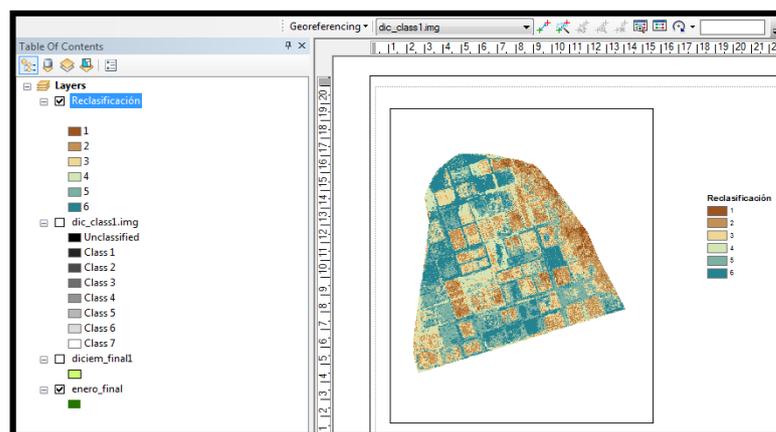


Figura 27: Reclasificación para zonas de crecimiento

Al reclasificar, se procedió a transformar el archivo raster a vector. Este archivo vector muestra información de los píxeles similares. Se eliminaron los polígonos que representan al suelo desnudo y vegetación alta, obteniendo así un solo archivo vector que representó al pasto como se ve en

la Figura 28. El mismo procedimiento se realizó para las diferentes etapas de crecimiento del pasto.

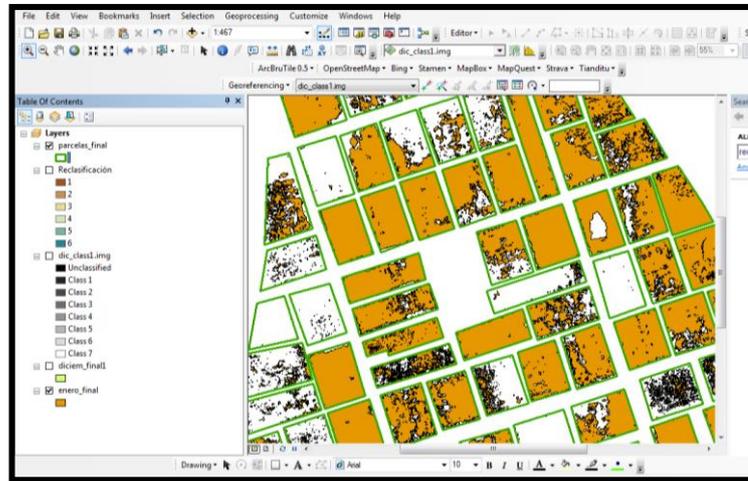


Figura 28: Crecimiento de pasto dentro de las parcelas experimentales

Para el cálculo de NDVI con el ortomosaico calibrado se aplicó la siguiente fórmula (2), en donde NIR representa la banda infrarroja y RED la banda roja del ortomosaico.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

El modelo se exportó en formato .tif para su análisis y con la intersección del archivo vector anteriormente obtenido, finalmente se generaron los índices de vegetación de cada unidad experimental. Esta metodología se aplicó en todos los ortomosaicos multitemporales. El NDVI al ser un índice sencillo de calcular genera una distorsión en los datos debido a las zonas de suelo desnudo. Todo esto se produce principalmente porque el índice del suelo desnudo es positivo, aunque con valores no muy elevados puede confundirse con vegetación arbustiva baja y alterar el resultado. En la Figura 29 se observa en color rojo el suelo desnudo, mientras que los tonos amarillos y verdes representan la vegetación.

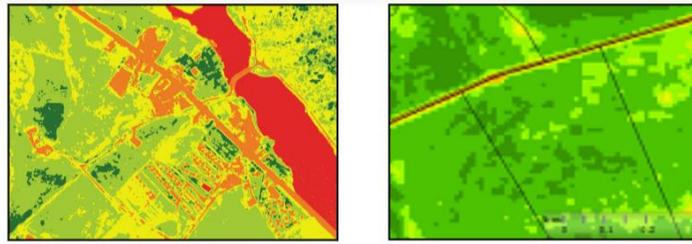


Figura 29: NDVI rojo (suelo desnudo),
NDVI verde (vegetación)

3.4.4. Volumen de biomasa

- Distribución y toma de puntos de muestreo

Para la realización del cálculo de biomasa mediante la diferencia entre volúmenes por parcelas con UAV, Robles et al. (2016), se identificó la importancia del factor de densidad de crecimiento del cultivo en un punto muestral porque representa el valor base para un cálculo masivo o generalizador por unidad experimental. Al contar con 54 parcelas válidas fue necesario realizar el muestreo por cada una de éstas. La distribución de las muestras se puede ver en la Figura 30.

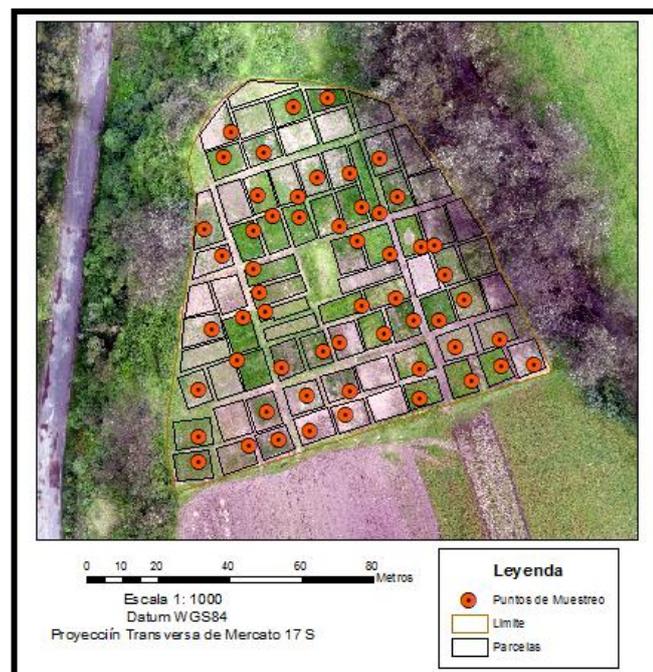


Figura 30: Distribución de muestras

(Robles et al., 2016) recomienda una toma de muestra destructiva; es decir, tomar todo el material orgánico del punto. Se elaboró un aro de metal con área de $0,25 \text{ m}^2$ para el muestreo. Se recogieron las muestras tomando las coordenadas con estación total. Las muestras fueron llevadas al laboratorio, donde se pesaron en húmedo y seco después de secarlas por 24 horas en la estufa. El procedimiento se puede observar en la Figura 31. En el anexo 5 se presenta las coordenadas de las muestras con su respectivo peso en seco y húmedo.



Figura 31: a.-aro metálico, b.-toma de coordenada, c.-corte, d.-recolección, e.-secado, f.- peso en seco

- Factor de Densidad de biomasa

El factor de densidad (Fd) es una constante que resulta de la cantidad de biomasa por volumen que se encuentre en un punto para poder generalizar biomasa en un área más extensa. En total se calcularon 54 factores de densidad que es el total de parcelas en el área de estudio.

El factor de densidad viene dado por la fórmula (3):

$$Fd = \frac{B}{V} \quad (3)$$

Dónde:

B: biomasa en el punto de muestreo de 0,25 m² convertido en Kg/Ha.

V: volumen por superficie de crecimiento de parcela entre la diferencia de superficies del MDT inicial con el MDS después del crecimiento del cultivo en m³/Ha.

Se tomó el modelo digital de superficie de enero para extraer el área de las 54 parcelas. Además, tomando como base el modelo digital del terreno de noviembre y los raster extraídos de enero se calculó el volumen entre las dos superficies. (Ver Figura 32).

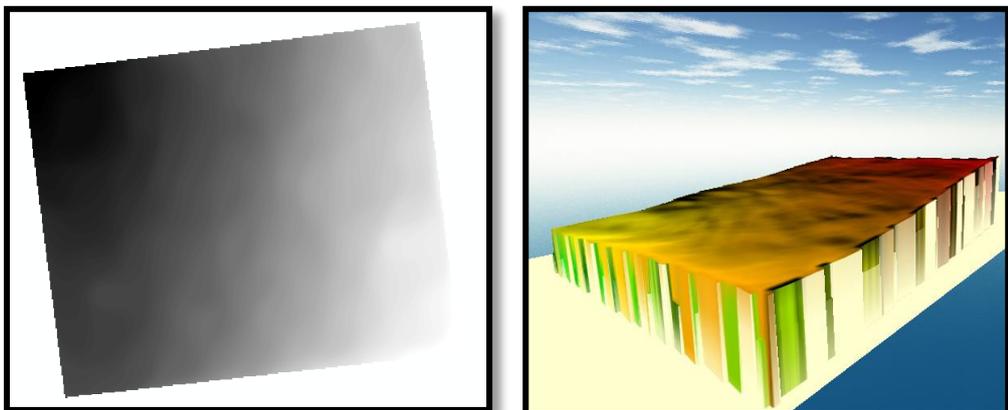


Figura 32: Raster de parcela y diferencia de modelos de noviembre y enero (Parcela 45)

- Biomasa por parcela

Con el Fd de cada parcela se obtuvo la diferencia entre MDT y MDS de cada unidad experimental. Mediante la extracción del raster por parcela de los dos modelos, se calculó el volumen entre las superficies de ambos raster. A cada parcela le correspondió un volumen específico y con ello se valoró la biomasa por unidad de superficie ajustada al área de cada parcela mediante la fórmula (4):

$$B = V.Fd \quad (4)$$

De la misma forma que en el índice NDVI se tomó en cuenta el crecimiento heterogéneo del pasto, que conllevó a la utilización de la clasificación no supervisada de los diferentes ortomosaicos multitemporales.

La distribución y crecimiento heterogéneo de los tres tipos de pasto no representa una afectación directa en el cálculo de volumen para la estimación de biomasa entre el MDS y MDT, ya que al conservar zonas sin cambio ni crecimiento en ambos modelos los resultados se mantienen. Claramente se puede observar en la Figura 33 la diferencia de crecimiento.

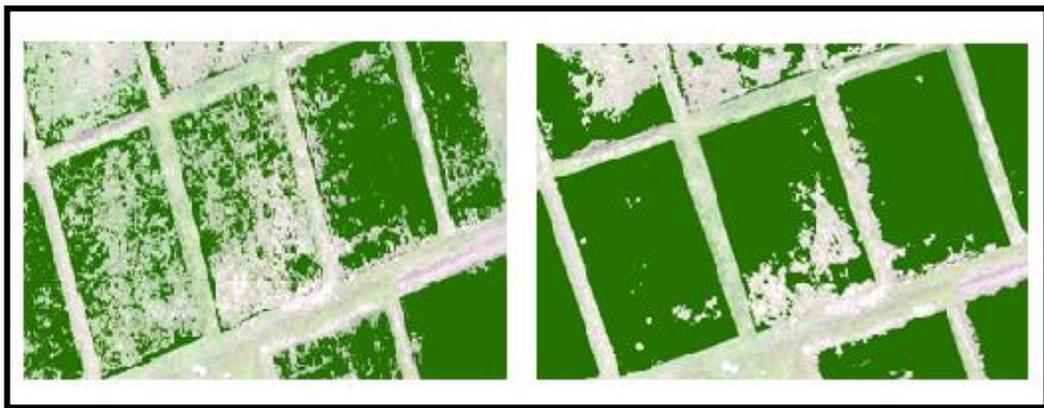


Figura 33: Crecimiento heterogéneo de las parcelas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Ortomosaicos

4.1.1. Ortomosaico en RGB

Durante la investigación se generaron tres ortomosaicos en color verdadero (RGB) obtenidos a partir del dron DJI Phantom 4. El primer vuelo se realizó antes de la siembra del cultivo del pasto (9 noviembre del 2017). El segundo fue en los primeros brotes del cultivo (21 de diciembre del 2017). Finalmente, el tercer vuelo se lo ejecutó en la etapa de corte del pasto (11 de enero del 2018) dos meses después de la siembra (ver Figura 34).

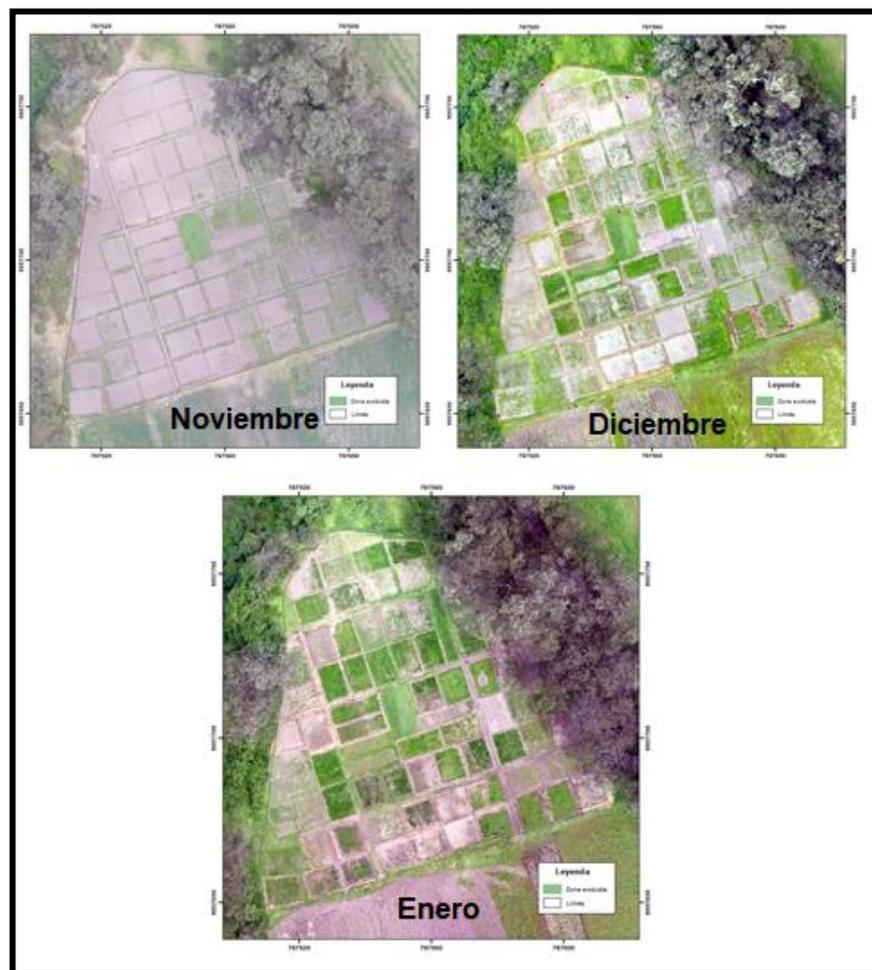


Figura 34: Ortomosaicos en RGB

4.1.2. Ortomosaico Multiespectral

Para el análisis del índice NDVI fue necesario generar dos ortomosaicos, el primero fue elaborado en el mes de diciembre, en los primeros brotes del cultivo y el segundo al momento del primer corte del pasto (ver Figura 35). Todos los vuelos se realizaron en el mismo día que los vuelos con cámara RGB. Estas imágenes se obtuvieron a partir de la lente modificada 3.97 mm (NIR Red+ NIR), lente que se instaló en el drone DJI Phantom 4. En el anexo 6 se ilustra el proceso del cambio de lente RGB por la lente citada.

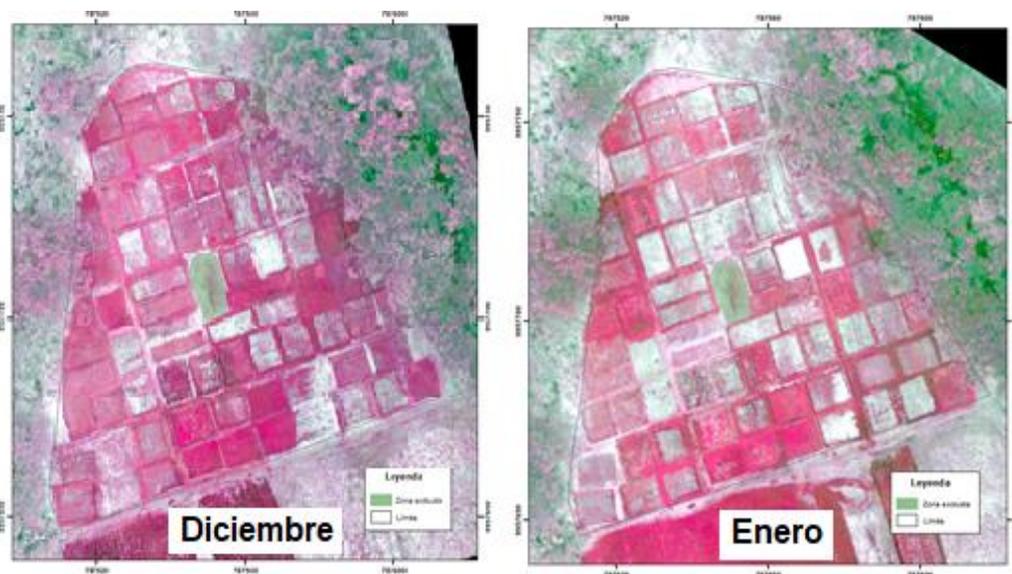


Figura 35: Ortomosaicos Multiespectrales

- Parcelas experimentales

La siembra de las parcelas fue de manera dispersa y uniforme en todo el terreno, con la técnica “al voleo”. El total de parcelas sembradas fueron 64 con sus respectivos tratamientos y cultivos, sin embargo, con el transcurso del tiempo el crecimiento fue decayendo y al momento de la cosecha solo se tomaron en cuenta 54 unidades experimentales en la zona de estudio (ver Tabla 12).

Tabla 12.*Número de parcelas sembradas y cosechadas*

TRATAMIENTOS	N° PARCELAS SEMBRADAS	N° PARCELAS COSECHADAS	% de Crecimiento
Kikuyo sin fertilización	6	5	83,33
Kikuyo con fertilización	8	2	25,00
Rye Grass Anual sin fertilización	11	11	100,00
Rye Grass Anual con fertilización	13	13	100,00
Rye Grass Perenne sin fertilización	14	12	85,71
Rye Grass Perenne con fertilización	12	11	91,66
TOTAL	64	54	84,37

4.2. Índice de crecimiento de pasto por EMC

Con los datos obtenidos en campo de las tres variables físicas (pendiente, orientación, luminosidad) del área de estudio, se generó el mapa que determina el índice de crecimiento del pasto de acuerdo a estas variables. Cada ponderación desarrollada mediante la matriz de Saaty modificó el peso de cada factor. Los resultados independientes de cada variable se pueden observar en la Figura 36, donde se muestra una pendiente alta en la zona central del área de estudio y una luminosidad baja en el sector cubierto por los árboles que dan sombra a esas parcelas.

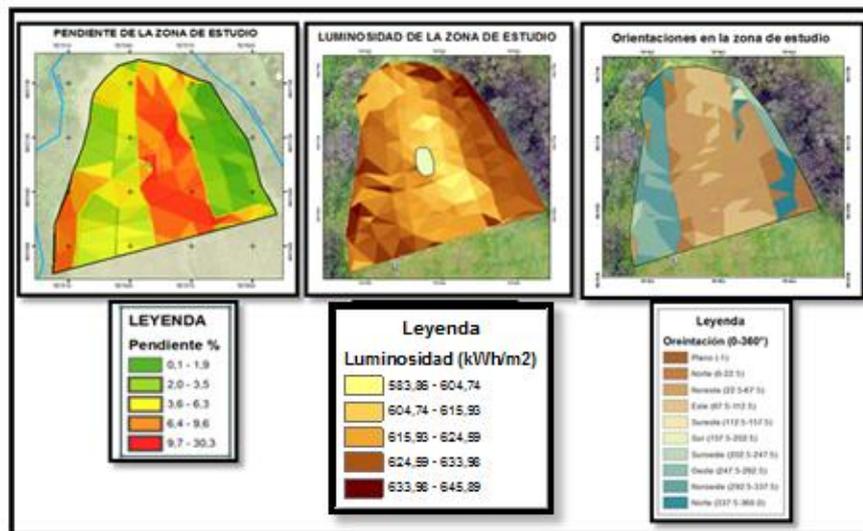


Figura 36: Variables físicas

- **Valores de Pendiente, Luminosidad y Orientación**

Existen notables diferencias en los datos de cada variable debido a la topografía del terreno y claramente la pendiente es un factor determinante. El rango de porcentaje de pendiente en el área de estudio es desde el 0,01 % hasta el 30,0%. En este caso existen pendientes muy altas y pendientes muy bajas de acuerdo a la clasificación de pendientes de W. Marsh (Arquero et al., 2009). Las pendientes con mayor porcentaje tienen un escurrimiento de agua mayor. El problema en tipos de pendiente que sobrepasan a 15% es la rápida erosión del suelo. Otro factor que afecta a los suelos en la erosión con alta pendiente es el viento. En adición a esto es importante recalcar que la pendiente está relacionada con la humedad, a mayor pendiente menor será la capacidad de retener agua y por éste motivo menor el porcentaje de humedad (Ménez et al., 1999).

En cuanto a los valores de orientación se destacaron parcelas con direcciones Noreste y Norte, además con 5 parcelas las orientaciones hacia el Sur fueron las más escasas. La variable luminosidad obtuvo valores entre 563,86 kWh/m² a 645,89 kWh/m². En la Tabla 13 se presenta el valor medio de porcentaje de pendiente, y el índice de luminosidad y orientación de cinco parcelas del área de estudio. (Anexo 7)

Tabla 13.*Pendiente, Luminosidad y Orientación*

N° Parcela	Pendiente (%)	Índice	Luminosidad (KWH/m ²)	Índice	Orientación	Índice
1	10,50	0,74	623,58	0,56	Oeste	0,78
7	5,09	0,86	528,14	0,64	Suroeste	0,79
28	3,09	0,87	631,14	0,90	Noreste	0,78
36	2,84	0,83	628,31	0,59	Oeste	0,39
60	20,46	0,79	592,88	0,43	Este	0,45

El resultado del índice de cada variable física, permitió calcular el índice total de crecimiento del pasto mediante una evaluación multicriterio. La matriz de Saaty determinó qué variable tenía más peso con respecto a las demás. La pendiente fue el factor principal con un peso en el índice final de 0,60 respecto a la orientación (0,12) y luminosidad (0,28). En la Figura 37 se observan tres zonas muy diferenciadas. Las parcelas que se encuentran en el centro tienden a ser deficientes al crecimiento del cultivo según el análisis multicriterio realizado.



Figura 37: Mapa de índice de crecimiento de pasto por EMC

A continuación, en la Tabla 14 se presentan los valores del índice obtenido por la metodología de evaluación multicriterio agrupados según la pendiente y el tipo de cultivo, en donde k es kikuyo, RGP, *rey grass perenne* y RGA, *rey grass anual*. Los valores de este índice varían especialmente por la topografía del terreno, mas no por el tipo de cultivo.

Tabla 14.*Índice de evaluación multicriterio*

N° Parcela	Topografía	Tipo de cultivo	Índice de EMC
1	Alto	RGA	0,652
13	Alta	RGA	0,815
28	Bajo	RGA	0,775
40	Alto	Kikuyo	0,788
60	Media	RGP	0,501

- **Análisis estadístico**

En la Tabla 15 se observan un valor mínimo de 0,29 y un valor máximo de 0,90 con una desviación estándar de 0,16 y una varianza de 0,03. El índice que predomina en el conjunto de datos es 0,67 correspondiente a las parcelas que se encuentran en una pendiente baja e iluminación solar alta.

Tabla 15.**Resumen estadístico****Índice de Evaluación Multicriterio**

Media	0,64
Error típico	0,02
Mediana	0,66
Moda	0,67
Desviación estándar	0,16
Varianza de la muestra	0,03
Mínimo	0,29
Máximo	0,90

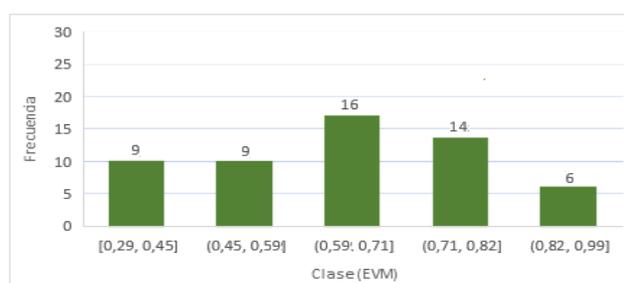


Figura 38: Histograma de datos del índice de EMC

En la Figura 38 se observa el número de parcelas presentes según las clases establecidas para este índice. El rango de 0,82 a 0,99 tienen 6 parcelas del total de 54 que son aptas para el cultivo tomando en consideración los factores: pendiente, luminosidad y orientación.

4.3. Biomasa

Los primeros datos arrojados para la estimación de biomasa mediante cálculo de volúmenes con UAV, son los resultados muestrales de biomasa de cada parcela experimental. Para la diferenciación de biomasa seca producida por cada parcela, se tomó en cuenta el factor de densidad. Este Fd mostró cuán eficiente es la parcela en producción de biomasa seca según su muestreo de campo y volumen de crecimiento (dato dado por la diferencia de modelos digitales de noviembre y enero). El promedio de los valores de factor de densidad en la agrupación de parcelas con tratamiento de fertilización fue de 0,5048 Kg/m³ en contraste de la agrupación de parcelas sin tratamiento, con un valor de 0,5314 Kg/m³. Paralelamente el resultado dependiendo el tipo de pasto fue ligeramente recíproco. El kikuyo y el rye grass anual poseen valores más altos a pesar de no haber contado con fertilización, a diferencia del rye grass perenne que incrementa su Fd reflejando más biomasa por volumen de crecimiento (Ver tabla 16).

Tabla 16

Factor de densidad por tipo de pasto

Tipo de pasto	Tratamiento	Fd Kg/m ³
Rye grass perenne	Con fertilización	0,5006
Rye grass perenne	Sin fertilización	0,4834
Rye grass anual	Con fertilización	0,4878

Continúa 

Rye grass anual	Sin fertilización	0,5342
Kikuyo	Con fertilización	0,4622
Kikuyo	Sin fertilización	0,4715

El factor de densidad fue el indicador preciso para identificar parcelas con buena producción de biomasa seca, ya que el peso de biomasa húmeda no representa la cantidad útil para el uso forrajero del pasto. El peso húmedo no refleja un mejor cultivo, pues el agua acumulada en pasto diluye el valor nutritivo por unidad de peso y aumenta el coste de los nutrientes como los menciona (De La Roza et. al, 2011) en su estudio de materia seca en forrajes.

Utilizando la clasificación no supervisada se analizó el área de crecimiento efectivo, cuyo dato respecto al volumen de cada parcela total representó una correlación lineal positiva débil de $R^2=0,35$. El área de crecimiento no representa una relación fuerte con el volumen de crecimiento. Las parcelas con esta característica fueron: 1, 3 y 11. Sus datos de $0,97 \text{ m}^3$; $1,16 \text{ m}^3$ y $2,21 \text{ m}^3$ se encuentran en porcentaje de área efectivas de crecimiento altas con 91,81 %, 53,84 % y 94,26%. Los datos de biomasa seca e índice de biomasa por volumen de parcela experimental mostraron grandes capacidades productivas de la siembra de pasto con fines forrajeros teniendo un promedio de producción de rye grass perenne de 309,63 Kg/Ha, para rye grass anual fue 329,49 Kg/Ha y kikuyo. Las parcelas fertilizadas con este cultivo obtuvieron 315,08 Kg/Ha. 310,76b Kg/Ha. Utilizando como base el máximo crecimiento de pasto (parcela 47) y con el dato de biomasa se logró generar el índice de volumen en las parcelas experimentales. Los datos de índice de biomasa por volumen de parcela son directamente proporcionales a la cantidad de biomasa seca producida en cada parcela (Tabla 17) (ver anexo 8 para información completa). (Figura 39).

Tabla 17:*Índice de biomasa por volumen de parcela.*

N°	Peso seco (kg)	Biomasa (kg/ha)	Volumen (m ³)	Área efectiva (m ²)	Fd (kg/m ³)	Biomasa Total	IVC
1	7,87	314,80	0,98	72,57	2,34	2,28	0,297
2	11,20	448,00	1,69	42,20	1,12	1,89	0,246
3	10,89	435,60	1,16	43,45	1,63	1,89	0,246
4	3,77	150,80	1,08	4,32	0,06	0,07	0,008
5	8,27	330,80	1,76	2,11	0,04	0,07	0,009
7	23,16	926,40	4,57	63,02	1,28	5,84	0,759
8	20,17	806,80	11,56	65,53	0,46	5,29	0,688
9	8,32	332,80	8,55	66,83	0,26	2,22	0,289
10	5,76	230,40	1,19	14,17	0,27	0,33	0,042
11	6,42	256,80	2,21	76,99	0,89	1,98	0,257
13	17,22	688,80	3,87	47,13	0,84	3,25	0,422
14	5,51	220,40	1,43	6,65	0,10	0,15	0,019
15	8,00	320,00	1,62	39,19	0,77	1,25	0,163
17	16,64	665,60	7,66	53,66	0,47	3,57	0,464
18	3,39	135,60	4,14	15,09	0,05	0,20	0,027
19	2,37	94,80	4,17	47,51	0,11	0,45	0,059
20	3,93	157,20	1,42	24,82	0,27	0,39	0,051
22	12,86	514,40	14,32	77,27	0,28	3,97	0,517
23	11,41	456,40	2,43	60,09	1,13	2,74	0,357
24	14,52	580,80	3,79	55,52	0,85	3,22	0,419
25	5,86	234,40	2,30	13,66	0,14	0,32	0,042
26	30,07	1202,80	6,48	63,91	1,19	7,69	1,000
27	10,65	426,00	4,00	60,98	0,65	2,60	0,338
28	15,57	622,80	5,08	68,56	0,84	4,27	0,555
29	4,73	189,20	4,42	63,50	0,27	1,20	0,156
31	10,51	420,40	14,69	75,47	0,22	3,17	0,413
33	16,24	649,60	9,84	67,32	0,44	4,37	0,569
34	11,09	443,60	6,86	42,69	0,28	1,89	0,246
36	8,36	334,40	3,53	54,96	0,52	1,84	0,239
37	5,05	202,00	1,48	9,74	0,13	0,20	0,026
40	7,60	304,00	4,13	47,17	0,35	1,43	0,186
41	8,95	358,00	2,55	56,18	0,79	2,01	0,262

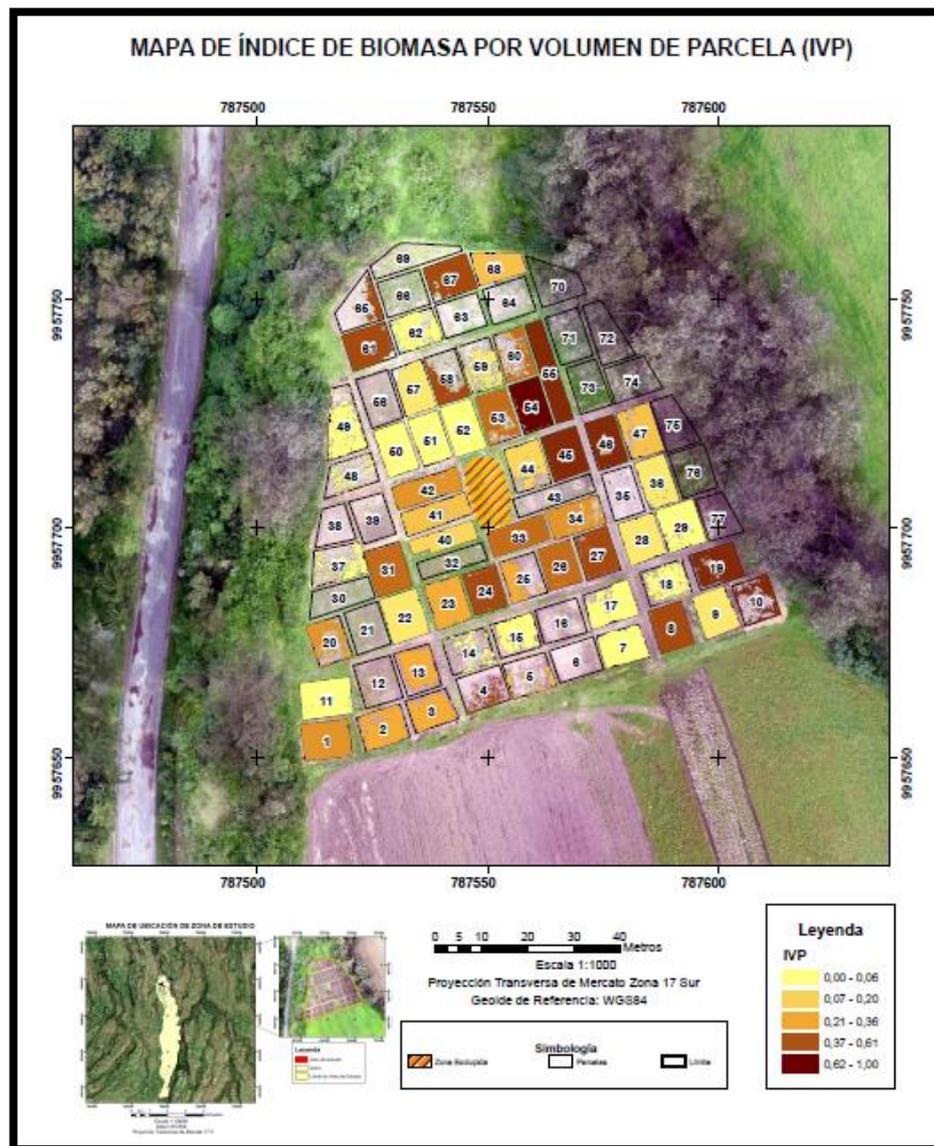


Figura 39: Mapa de índice de biomasa por volumen de parcela

4.4. Índice NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada permite conocer la vigorosidad y estado de la vegetación aprovechando la absorción de las bandas visibles y la fuerte reflectancia del infrarrojo cercano (Manrique, 1999). Tomando en cuenta las etapas de crecimiento del pasto a continuación se presentan los mapas de NDVI (Figura 40 y 41), que

muestran a la zona de estudio en escala de colores. Las tonalidades rojas y amarillas representan escasa cobertura vegetal, mientras que los colores verdes simbolizan áreas con mayor densidad vegetal.

Las Figuras muestran un comportamiento dinámico de la vegetación, que disminuye o aumenta en algunas unidades experimentales. Como se mencionó anteriormente el número de parcelas disminuyó debido a que la cobertura vegetal alta que cubre las parcelas a estudiar y en otras al escaso crecimiento de la especie forrajera. Un factor determinante para el desarrollo de un cultivo según (Dedios, 2009) corresponde a la estacionalidad climática, factor que pudo afectar en alguno de los tipos de pasto sembrados.

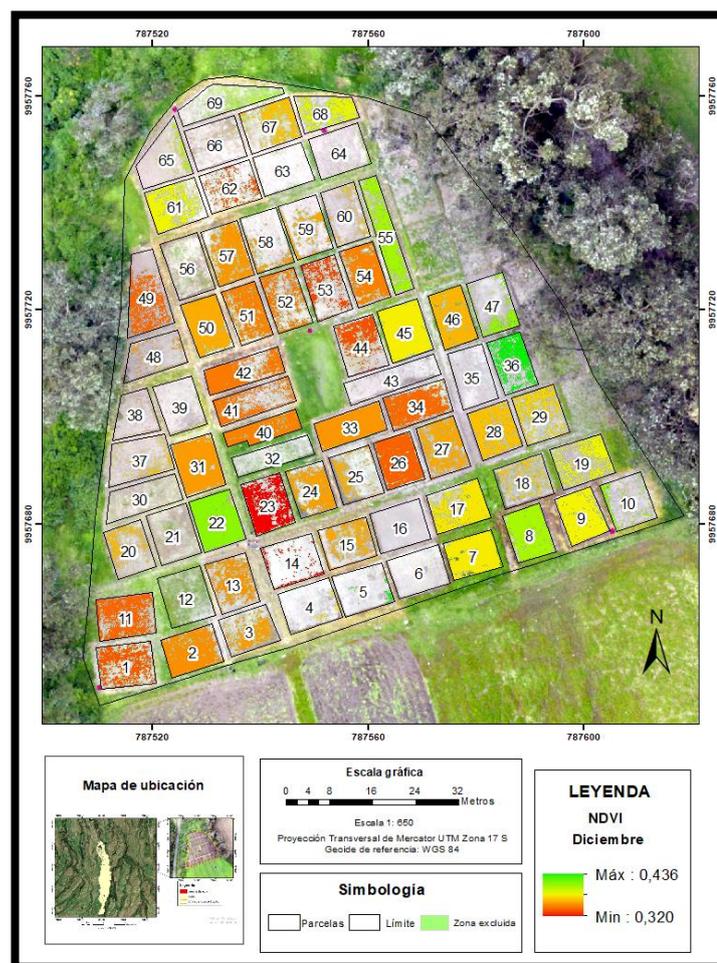


Figura 40: Mapa del índice NDVI del mes de diciembre

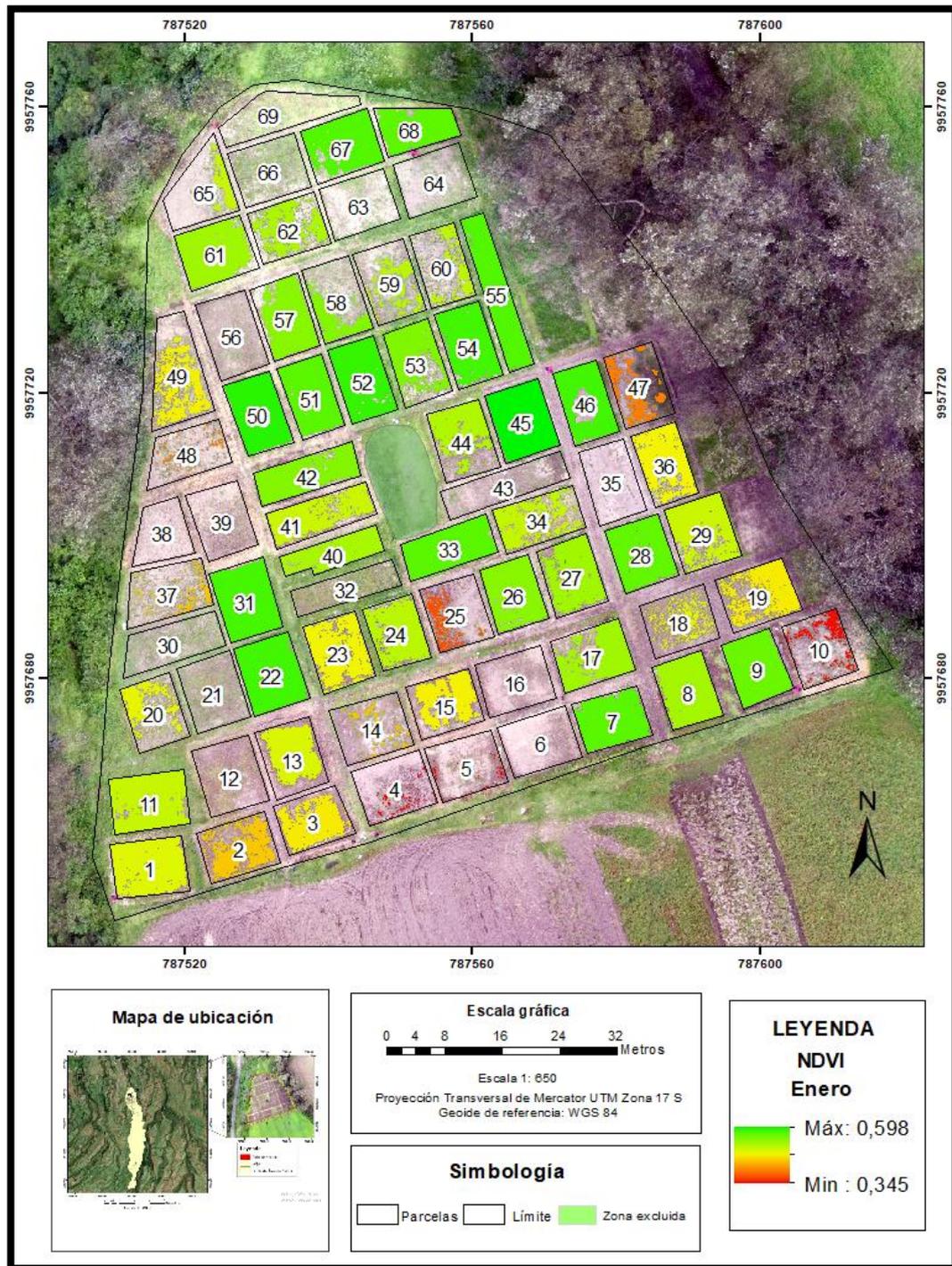


Figura 41: Mapa del Índice de NDVI del mes de enero

Las figuras 42 y 43 representan los valores de NDVI normalizados siendo 0,5 el valor máximo para los dos mapas. Sin embargo, su valor mínimo difiere siendo el más alto en el mes de diciembre con un valor de 0,366

correspondiente a la parcela 14. Para el mes de enero fueron 7 parcelas con el índice más bajo cuyo valor fue de 0,288. Esto es debido al inadecuado crecimiento del cultivo, ya que en estas parcelas se sembró kikuyo.

En estos mapas multitemporales se diferencian de manera clara el aumento del valor de NDVI especialmente de las parcelas 50 a 55. Un factor para este crecimiento y vigorosidad fue el tipo de cultivo sembrado y estas parcelas fue el *rye grass*. Esta especie es de rápida germinación y se adapta a suelos francos y arcillosos, aunque es referible en suelos húmedos y fértiles (Cruz et al., 2013).

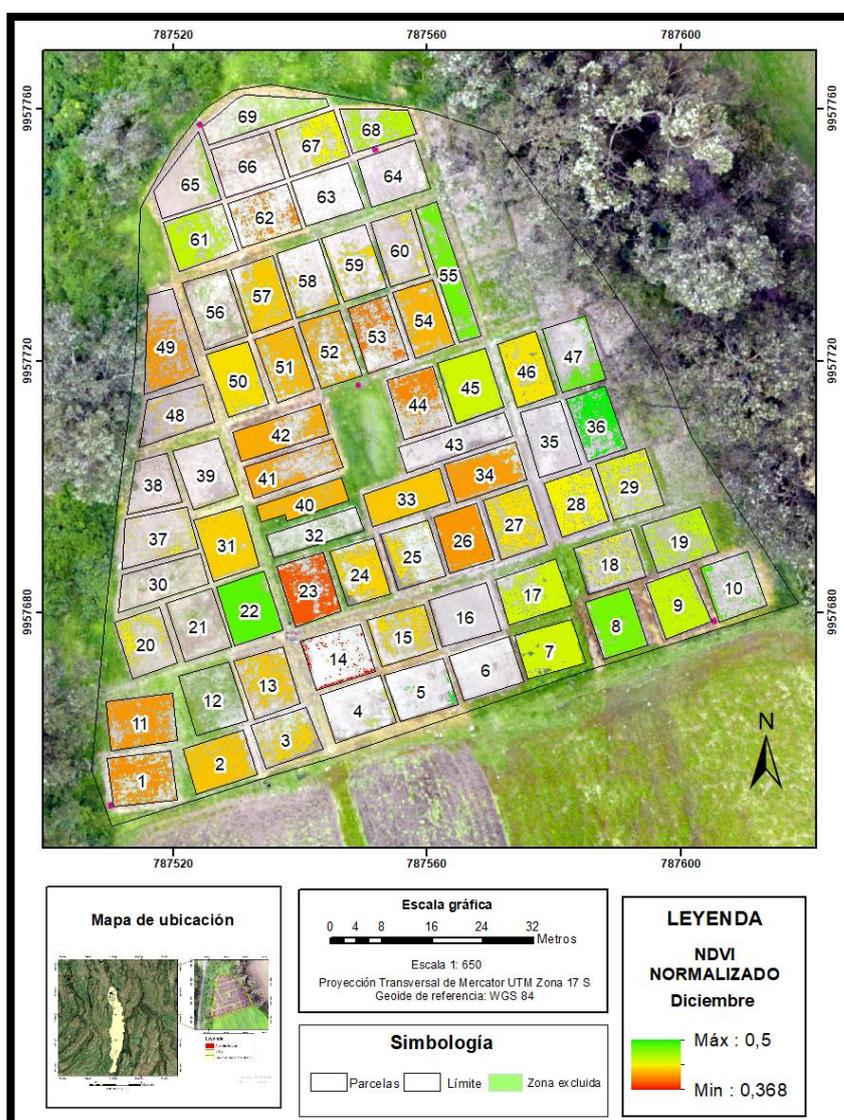


Figura 42: NDVI Normalizado mes de diciembre

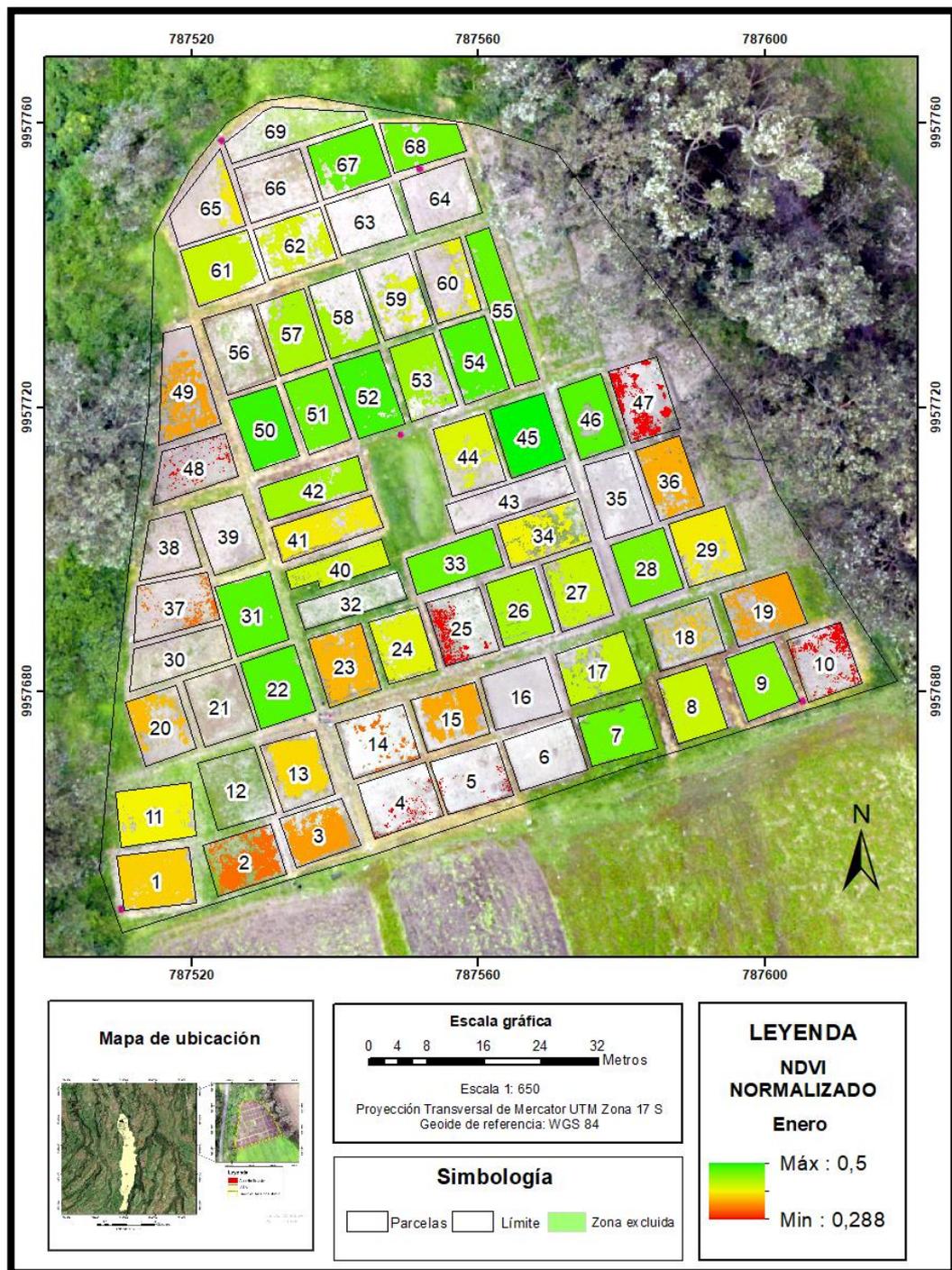


Figura 43: NDVI Normalizado mes de enero

Como complemento de la información de los mapas de NDVI en la Tabla 18 se presenta un análisis estadístico de la zona de estudio respecto al índice de vegetación con los tratamientos efectuados, el área en m² de vegetación y el porcentaje de crecimiento.

Tabla 18.*Análisis estadístico del índice NDVI*

Tratamiento	Diciembre			Enero		
	NDVI Promedio	Área con vegetación Promedio (m ²)	% de Crecimiento	NDVI Promedio	Área con vegetación Promedio (m ²)	% de Crecimiento
Kikuyo sin fertilización	0,377	14,88	25,81	0,453	17,75	29,94
Kikuyo con fertilización	0,363	10,65	14,43	0,482	19,09	25,61
Rye Grass Anual sin fertilización	0,368	50,66	69,21	0,553	63,38	85,85
Rye Grass Anual con fertilización	0,371	54,96	74,71	0,563	66,05	90,34
Rye Grass Perenne sin fertilización	0,371	26,80	37,26	0,512	42,57	59,31
Rye Grass Perenne con fertilización	0,362	24,83	33,18	0,487	33,90	45,36

De la Tabla 18 se observa que según el tratamiento aplicado a la zona de estudio varía la respuesta del NDVI. El *rey grass anual* con o sin fertilización presenta un notable crecimiento, así como el aumento significativo del valor de NDVI. El pastizal *Rye Grass Perenne* en cambio creció sin necesidad de fertilización. Esto puede ser debido a ciertos factores que afectan el crecimiento de la vegetación como son: el tipo de suelo, riego, el control de malezas y los actores climáticos (Grijalva, et.al, 1995).

Los valores de NDVI y el porcentaje de área con vegetación están muy correlacionados ($r^2 = 0,964$) como se observa en la Figura 44. El modo lineal explica la relación directa entre el área de vegetación efectiva y el NDVI, es decir si el NDVI aumenta, el porcentaje de crecimiento también lo hará. Este índice es exclusivo de los espectros de la vegetación discriminando

totalmente los espectros mostrados por del suelo (Gilabert et al., 1997). En el anexo 9 se detalla los resultados de cada parcela.

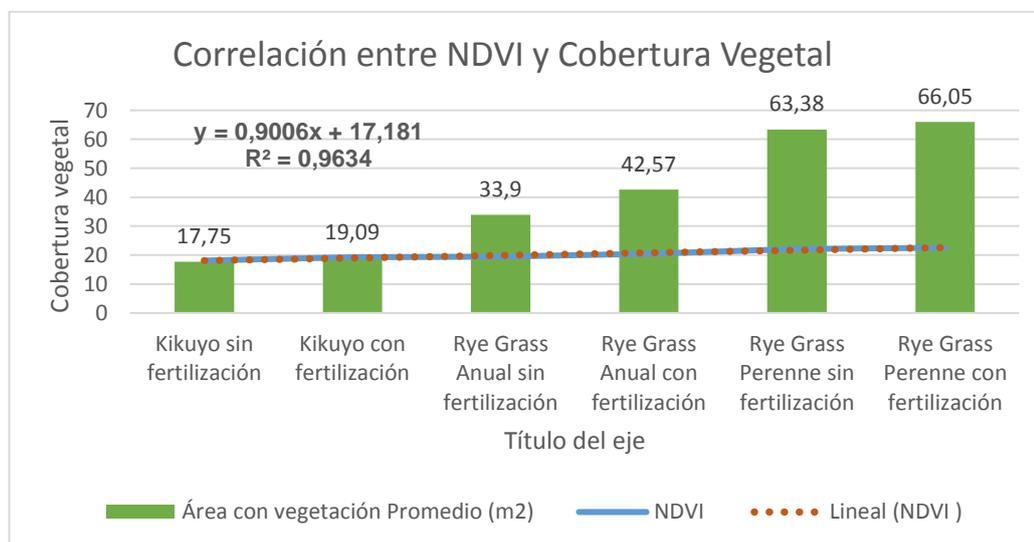


Figura 44: Correlación del NDVI y la Cobertura Vegetal

4.5. Análisis de la correlación

La correlación permite medir la relación entre dos variables mediante técnicas estadísticas en especial con el coeficiente de correlación de determinación (r^2) (García, 2015). En el presente estudio se determinó este coeficiente para las variables de NDVI, EMC y biomasa en cada tratamiento. Como se observa en la Tabla 19, el tratamiento de kikuyo con fertilización no logró obtener ninguna relación porque el número de parcelas crecidas fue de 2. La fertilización nitrogenada conlleva a modificaciones en la calidad nutricional de las pasturas. Estos resultados concuerdan con (Mejía et al., 2014), ya que la materia seca tendió a disminuir a medida que aumentaron la dosis de fertilizante.

En cuanto a la correlación de la biomasa con las características físicas se alcanzó un máximo de 0,52 con el cultivo *rye grass anual*, lo que indica que esta especie forrajera puede ser adaptable a cualquier tipo de suelo. El valor mínimo valor que se obtuvo fue de 0,17 siendo una correlación débil para el

rye grass perenne. Esto se debe al valor de biomasa que presenta este cultivo, es decir que a pesar de tener excelentes condiciones físicas el cultivo no crece en forma directa con estas variables (ver Tabla 20 y Figura 45).

En cuanto al índice NDVI y las características del suelo, existe una correlación máxima de 0,56 en el cultivo de *rye grass* sin fertilización, siendo este cultivo el que cuenta con la mayor vigorosidad. En contraste el mismo cultivo fertilizado obtuvo valores de NDVI que se mantienen constantes a pesar de estar sembrado en diferentes parcelas, por lo cual no existe ninguna relación entre las dos variables.

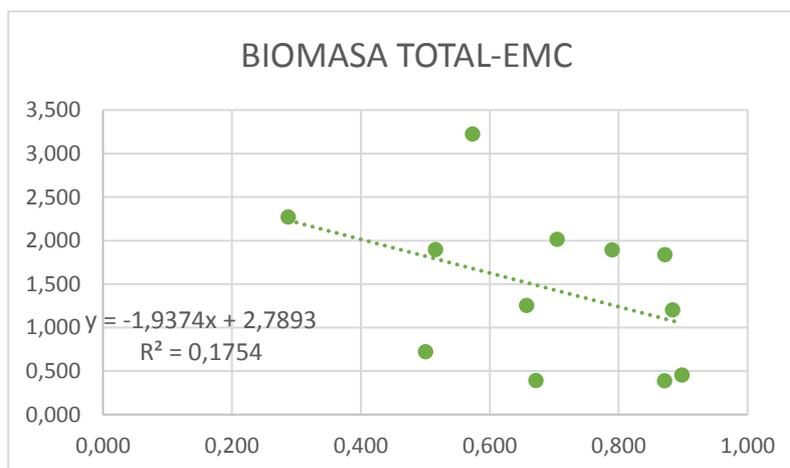
Tabla 19.

Correlación entre índices

TRATAMIENTOS	PROMEDIO			CORRELACIÓN (r ²)	
	BIOMASA (KG)	EMC	NDVI	BIOMASA EMC	NDVI-EMC
Kikuyo sin fertilización	0,547	0,589	0,453	0,46	0,33
Kikuyo con fertilización	-----	-----	-----	-----	-----
Rye Grass Anual sin fertilización	3,057	0,619	0,553	0,52	0,14
Rye Grass Anual con fertilización	4,260	0,671	0,559	0,45	0,05
Rye Grass Perenne sin fertilización	1,461	0,685	0,512	0,17	0,54
Rye Grass Perenne con fertilización	1,298	0,629	0,487	0,50	0,56
PROMEDIO	2,15	0,639	0,513	0,420	0,324

Tabla 20.*Cultivo Rye grass perenne*

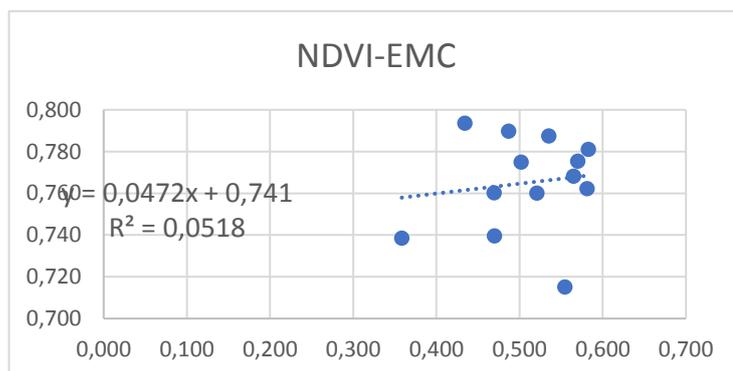
SIN FERTILIZACIÓN	
EMC	BIOMASA TOTAL
0,790	1,893
0,672	0,390
0,704	2,011
0,871	0,388
0,898	0,452
0,884	1,201
0,872	1,838
0,657	1,254
0,573	3,224
0,516	1,894
0,287	2,269
0,501	0,721

**Figura 45:** Correlación entre BT-EMC

En la Tabla 21 se observa que los valores de NDVI son constantes a diferencia del índice de evaluación multicriterio, es decir que esta especie forrajera es adaptable a cualquier tipo de suelo y crece con facilidad especialmente si se aplica una dosis de fertilización (Grijalva et al., 1995). Esto indica una relación casi nula $r^2=0,05$ (ver Figura 46)

Tabla 21.*Cultivo Rye grass anual***CON FERTILIZACIÓN**

NDVI	EMC
0,521	0,760
0,583	0,781
0,581	0,762
0,489	0,795
0,590	0,705
0,538	0,615
0,570	0,775
0,577	0,638
0,574	0,597
0,552	0,494
0,598	0,556
0,573	0,596
0,520	0,651

**Figura 46:** Correlación entre NDVI-EMC

En general la correlación que existe entre las variables físicas del suelo entre la biomasa y NDVI es de 0,420 y 0,324 respectivamente, siendo una relación positiva débil entre estas variables ajustándose a una función lineal. Es decir, que el cultivo de pasto se adapta con facilidad a los cambios de pendiente, luminosidad y orientación, en especial el *rye grass*. El kikuyo en cambio no creció de la forma esperada al aplicar el fertilizante (10-30-10). Otros factores que influyeron en el desarrollo de esta planta fueron: manejo y control de malezas, riego, cuidado de la parcela, estacionalidad de lluvias.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El estudio contó en un inicio con 77 unidades experimentales, en las cuales se cultivaron diferentes especies forrajeras como: kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), rye grass anual (*Lolium multiflorum*) y rye grass perenne (*Lolium perenne*) y se aplicaron dos tratamientos con y sin fertilización. Sin embargo, en la etapa de cosecha solo se estudiaron 54 parcelas. Ocho de ellas fueron excluidas por estar en una zona cubierta de vegetación alta de tipo arbóreo que dificultó la obtención de imágenes con UAV y otras 15 parcelas por el crecimiento inadecuado para el estudio, en especial aquellas en las que se sembró kikuyo.

Se obtuvieron cinco ortomosaicos, tres en RGB y dos con la lente modificada utilizando el drone DJI Phantom 4. Estos vuelos se realizaron de manera multitemporal, de forma que se capturó información al inicio, a la mitad y al final del crecimiento del pasto (primer corte: 60 días). Gracias a estos insumos se pudo realizar el análisis adecuado de los respectivos índices. Los mosaicos tuvieron una resolución espacial de 3 cm por píxel aproximadamente.

La fertilización para la siembra y el desarrollo del cultivo se lo realizó con base a los análisis de suelo. Se efectuó una fertilización compuesta (10-30-10) recomendado para cultivos de ciclo corto. Sin embargo, este estudio al ser una investigación experimental solo se aplicó a 33 parcelas. A pesar de que el crecimiento de las parcelas con fertilización fue menor con tan solo 26 de 33 fertilizadas su índice de vegetación fue el más alto con un valor de 0,56 del cultivo rye grass.

Los resultados de producción de biomasa seca en las parcelas experimentales muestran que no existe una diferencia marcada entre la utilización de fertilizantes en los tres tipos de pasto, tomando en cuenta solo la metodología de volumen mediante uso de drone.

El análisis mediante evaluación multicriterio logró caracterizar la zona de estudio a partir de tres variables físicas establecidas: pendiente, orientación y luminosidad. El factor con mayor ponderación en la matriz de Saaty fue la pendiente con un porcentaje del 60% de importancia con respecto a las demás variables.

El crecimiento del cultivo forrajero fue en forma desigual en cada parcela experimental. El principal problema que conlleva al tener un crecimiento heterogéneo es la alteración de resultados tanto en el índice de NDVI como en el volumen de biomasa de las parcelas. Por lo cual, se implementó una clasificación no supervisada del todo el área para así discriminar suelo desnudo y vegetación alta. Es necesario realizar este procedimiento para no alterar los resultados de NDVI.

Según la metodología implementada por Robles (2016) para el cálculo de biomasa mediante la diferencia de volúmenes entre MDS y MDT es indispensable la toma de muestras en campo para verificar y obtener un factor de densidad que permita calcular el total de biomasa.

El análisis realizado mediante evaluación multicriterio y la relación que existe con la biomasa de las parcelas fue de 0,42. Esto indica una correlación positiva débil, es decir que el cultivo forrajero se adapta de mejor manera a todo tipo de pendiente, luminosidad y orientación especialmente el cultivo rye grass.

El índice de vegetación de diferencia normalizada permite verificar el estado del cultivo y con una inversión pequeña en una lente modificada se pueden hacer estimaciones del valor de NDVI. Es así que el valor máximo de este índice se encuentra en el cultivo rye grass anual con fertilización verificando que este tratamiento aumentó de 0,36 a 0,59 siendo la especie

forrajera más vigorosa. Al igual que su mínimo valor fue de 0,35 a 0,42 con kikuyo sin fertilización. En cuanto a la relación que existe con las características del suelo presenta un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,32$. Se concluye que, a pesar de tener ciertos rasgos en el suelo, el tratamiento y el cultivo que se aplique es fundamental para su desarrollo y crecimiento.

El rye grass es un pasto que se puede establecer en condiciones más desfavorables que el kikuyo ya que presenta el valor más alto de NDVI y biomasa. Haciéndolo la principal fuente forrajera para la alimentación del ganado por su rápido crecimiento y alto valor nutricional.

5.2. Recomendaciones

- Al ser unidades experimentales se puede variar los factores que afectan a un cultivo determinado y es recomendable tomar la mayor cantidad de variables para tener datos con mayor precisión.
- Controlar de manera adecuada las malezas, ya que al ser un cultivo forrajero este tipo de plantas tienden a crecer de manera exponencial en toda el área de las parcelas interviniendo en los datos tomados en campo.
- Para temas de agricultura de precisión se recomienda analizar otro tipo de índices como SAVI, RVI, TVI, entre otros.
- Para realizar los vuelos multiespectrales es necesario cambiar a un lente que permita tomar las fotografías en infrarrojo, además la calibración ya sea de las imágenes o el ortomosaico generado es indispensable para calcular el NDVI.

BIBLIOGRAFÍA

- AgiSoft, L. L. C., & St Petersburg, R. (2014). Agisoft photoscan. *Professional Edition*.
- Aguayo C. (2010). El Drome del Instituto Geográfico Militar, uso específico y su operación en áreas estratégicas requeridas por diferentes organizaciones, 275.
- Agüera, J., Barreiro, L., Blanco, M., & García, A. (2013, December). Teledetección agroforestal: el futuro que ya está aquí. *Ambienta*, 92. Retrieved from http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AM/Ambienta_2013_105_completa.pdf
- Arango, M., Branch, J., & Botero, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: "LANDSAT- ETM+." *Facultad Nacional de Agricultura Medellín*, 58(1), 2611–2634.
- Arquero Hidalgo, Á., Álvarez Alonso, M., & Martínez Izquierdo, E. (2009). Decision management making by AHP (Analytical Hierarchy Process) trough GIS data. *IEEE Latin America Transactions*, 7(1), 101–106. <https://doi.org/10.1109/TLA.2009.5173471>
- Badii, M. H., Castillo, J., Rodríguez, M., Wong, A., & Villalpando, P. (2007). Diseños experimentales e investigación científica. *Innovaciones de Negocios*, 4(2), 283–330.
- Barbosa, C. C. F. (1997). Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento. São José Dos Campos. 152p.(INPE-7115-TDI/667) *Dissertação (Mestrado Em Sensoriamento Remoto)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*.
- Barrientos, A., Del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., &

- Rossi, C. (2009). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. *Grupo de Robótica Y Cibernética, Universidad Politécnica de Madrid*, 1–29.
- Bianchini, A. (2012). Muestreo de suelos para manejo de la nutrición de cultivos. *Fertilizar*, 23(2017–02–17 17:18), 4. Retrieved from <http://www.fertilizar.org.ar/subida/revistas/Articulos/2012/2012 - n° 23 - Muestreo de suelos para manejo de la nutrición de cultivos.pdf>
- Borbor, J. (2013). Evaluación Agronómica y Nutricional del Pasto Maralfalfa (*Pennisetum spp.*) bajo dos métodos de propagación y tres programas de fertilización en la Parroquia Cerecita, Provincia del Guayas. Guayaquil - Ecuador.
- Castellanos, V. (2009). Analítico: Evaluación morfoagronómica y nutricional de cinco variedades de rye grass bianual (*Lolium multiflorum*) en lugares representativos de las zonas de producción de leche de las provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha.
- Cobos Espinoza, F. B., & Narváez Vélez, D. M. (2017). Fenología y producción de rye grass *lolium multiflorum* bajo sistema de labranza convencional y alternativa en la granja de Irquis.
- Cruz, M. C., Rodríguez, L. C., Viera, R. G., Mouso, J. P., Cabrera, D. M., Escobar, Y. T., ... Socarrás, Y. C. (2013). Evaluación Agronómica de cuatro nuevas Variedades de Pastos. *Revista de Producción Animal*, 25(1).
- Cuichan, C., & Euclides, V. (2015). Rendimiento de biomasa de dos variedades de rye grass a tres fuentes de fósforo en la zona Cayambe, provincia de Pichincha. Babahoyo: UTB, 2015.
- De La Roza, B., Fernández, A., & Gutiérrez, A. (2011). Determinación de materia seca en pastos y forrajes a partir de la temperatura de secado para análisis. *Pastos*, 32(1), 91–104.

- Dedios, N. (2009). Análisis espacial del comportamiento fenológico de la vegetación en la cuenca del río Chira usando imágenes de alta resolución espectral. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA (1)*, 20, 34.
- Díaz, 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 ., 78. Retrieved from http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Eastman, R. (1993). Participatory Multi-Objective Decision-Making in GIS. *Auto-Carto-11*.
- Elika. (2013). Drones y su uso en la agricultura. *Fundación Vasca*, 1–4.
- Escribano, J. (2015). Selección de índices de vegetación para la estimación de la producción herbácea en dehesas. *Pastos*, 44.
- ESPA. (2014). Encuesta De Superficie Y Producción Agropecuaria Continua Espac 2013, 1–8.
- Felicísimo, A. M. (1994). Conceptos básicos, modelos y simulación. *Modelos Digitales Del Terreno*, 122. Retrieved from <http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/CursoMDT.html>
- García, 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 ., 78.
- García, J. L. L. (2002). *Fotogrametría moderna: analítica y digital*. BOOK, Universidad Politécnica de Valencia.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8(10).
- Grijalva, J., Espinosa, F., & Hidalgo, M. (1995). *Producción y utilización de pastizales en la región interandina del Ecuador*. INIAP Archivo Historico.

- Herrera Herrera, B. (1987). uso de materiales aerofotograficos. Elementos de fotogrametria. JOUR.
- IG & IRD. (2005). Cotopaxi, 157. Retrieved from <https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/39-los-peligros-volcanicos-asociados-con-el-cotopaxi/file>
- INEC. (2011). Datos estadísticos agropecuarios. *Instituto Nacional de Estadísticas Y Censos*, 14. Retrieved from http://www.inec.gob.ec/espac_publicaciones/espac-2011/INFORME_EJECUTIVO_2011.pdf
- Jaramillo, D. F., Anaya, M. L., Restrepo, C. A., González, H. A., & Álvarez, F. (2011). Variables físicas que explican la variabilidad de suelo aluvial y su comportamiento espacial. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 46(12), 1707–1715.
- Kettle, A. J., Andreae, M. O., Amouroux, D., Andreae, T. W., Bates, T. S., Berresheim, H., ... DiTullio, G. R. (1999). A global database of sea surface dimethylsulfide (DMS) measurements and a procedure to predict sea surface DMS as a function of latitude, longitude, and month. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(2), 399–444.
- León, M. (2003). Pastos y forrajes, producción y manejo. Ediciones Científicas Agustín Álvarez A. *Cía. Ltda. Sangolquí. EC*, 157–188.
- Li, W., Niu, Z., Chen, H., Li, D., Wu, M., & Zhao, W. (2014). Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Ecological Indicators*, 67, 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.036>
- Macedo-Cruz, A., Pajares-Martinsanz, G., & Santos-Pe??as, M. (2010). Clasificaci??n no supervisada con im??genes a color de cobertura terrestre. *Agrociencia*, 44(6), 711–722.

- Madrigal, A. (2013). Evaluación del crecimiento de pastos usando índices de vegetación calculados a partir de información satelital, 91.
- Manrique, E. G. (1999). Índice de vegetación. Aplicación del NDVI. *Teledetección. Avances Y Aplicaciones*.
- Martínez, E. (2007). Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME. *Anuario Juridico Y Economico Escorialense XL*, 523–542. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2267954.pdf>
- Mejía, A., Ochoa, R., & Medina, M. (2014). Efecto de diferentes dosis de fertilizante compuesto en la calidad del pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst. Ex Chiov.). *Pastos Y Forrajes*, 37(1), 31–37.
- Meneses, V. A. B., Téllez, J. M., & Velasquez, D. F. A. (2015). Uso de Drones para el análisis de Imágenes Multiespectrales en Agricultura de Precisión. *@limentech, Ciencia Y Tecnología Alimentaria*, 13(1), 28–40.
- Ménez, M. R. M., Reynoso, D. S. F., & Mota, J. L. (1999). Cultivo en franjas. *Subsecretaría de Desarrollo Rural Dirección General de Desarrollo Rural*, (Especialidad de Edafología, IRENAT Colegio de Postgraduados), 5.
- Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo del Milenio. *Naciones Unidas*, 64.
- Ñústez, C. E., Santos, M., Navia, S. L., & Cotes, J. M. (2006). Evaluación de la fertilización fosfórica foliar y edáfica sobre el rendimiento de la variedad de papa 'Diacol Capiro' (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomía Colombiana*, 24(1), 111–121.
- Olate, K. S. K. (2010). Dinámica de crecimiento y calidad nutritiva de una pradera de *Lolium perenne* L. sometida a diferentes frecuencias de defoliación: periodo primavera-verano.
- Otero, I., Ezquerro, a., Rodríguez Solano, R., Martín, L., & Bachiller, I. (2008). Fotogrametría, 1–134.

- Pacheco, C., & Pozzobon, E. (2011). *Manual de ejercicios de laboratorio. Fotogrametría y fotointerpretación.*
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Palacios, D. (2012). Determinación de la calidad nutritiva de mezclas forrajeras y frecuencias de aprovechamiento en microsilos., 10.
- Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 17(3), 4–22.
- Pascual, F., Paz, F., & Bolaños, M. (2012). Estimación de biomasa aérea en cultivos con sensores remotos. *Terra Latinoamericana*, 30(1), 17–28.
- PEAU, P. (2009). No Title. Retrieved from
<https://www.peauproductions.com/pages/about-us>
- Pérez, J. (2001). Apuntes de Fotogrametría II. *Centro Universitario de Mérida*, 53(9), 1689–1699.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ramírez, M. L. (2004). El método de jerarquías analíticas de Saaty en la ponderación de variables. Aplicación al nivel de mortalidad y morbilidad en la provincia del Chaco. *Comunicaciones Científicas Y Tecnológicas de La Universidad Nacional Del Nordeste*, 4.
- Robles, J. L., Gil-Do Campo, M. L., Ortiz, J., Martínez, S., Garrido, F., Sánchez, L., ... Ortiz, L. (2016). Determinación de biomasa en parcelas de cultivos herbáceos mediante cámaras ópticas elevadas por medio de vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Revista Ibérica de Sistemas Y Tecnologías de Información*, 4, 95–103.
- Sani, J. (2015). Vehículos aéreos no tripulados – UAV para la elaboración de cartografía escalas grandes referidas al marco de referencia Sirgas-Ecuador., 98.
- Seis, I. D. E., & Del, L. (2010). Estimación de la biomasa aérea de seis leguminosas leñosas del Chaco Árido (Argentina). *Asociación Argentina*

de Ecología, 71–79.

- Selsam, P., Schaeper, W., Brinkmann, K., & Buerkert, A. (2017). Acquisition and Automated Rectification of High-Resolution Rgb and Near-Ir Aerial Photographs To Estimate Plant Biomass and Surface Topography in Arid Agro-Ecosystems. *Experimental Agriculture*, 53(1), 144–157. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000089>
- Senplades. (2017). Plan Nacional Buen Vivir 2017-2021.pdf. *SENPLADES-Ecuador*. Recuperado el 20 de noviembre del 2017 de http://www.planificacion.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL_0K.compressed1.pdf
- Speranza, F., & Zerda, H. (2005). Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales. *Proyecto Picto*, 12931.
- Stockle et al. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18, 289–307. [https://doi.org/Pii S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/Pii S1161-0301(02)00109-0)
- Trimble, S. (2015). Notas técnicas.
- Vila, A., Sedano, M., & López, A. (2004). Correlación lineal y análisis de regresión. *Barcelona: Universidad Oberta de Catalunya*.
- Villalobos, L., & Sánchez, J. M. (2010). Evaluación agronómica y nutricional del pasto ryegrass perenne tetraploide (*Lolium perenne*) producido en lecherías de las zonas altas de Costa Rica. II. Valor nutricional. *Agronomía Costarricense*, 34(1), 43–52.
- Wind, Y., & Saaty, T. L. (1980). Marketing applications of the analytic hierarchy process. *Management Science*, 26(7), 641–658.