



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 INGENIERA GEÓGRAFA Y DEL MEDIO AMBIENTE

TEMA: ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y ANÁLISIS DE LA
VARIABILIDAD ESPECTRAL DE CHOCHO (*LUPINUS MUTABILIS
SWEET*) POR LA APLICACIÓN DE MÉTODOS DE CONTROL
BIOLÓGICO EN DOS ENSAYOS CONTROLADOS UTILIZANDO
SENSORES REMOTOS

AUTORAS: SIMBAÑA ROMERO, ERIKA VANESSA
TELLO BORJA, JOHANNA MAITE

DIRECTOR: ING. SINDE GONZÁLEZ, IZAR

SANGOLQUÍ

2020



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *“ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPECTRAL DE CHOCHO (LUPINUS MUTABILIS SWEET) POR LA APLICACIÓN DE MÉTODOS DE CONTROL BIOLÓGICO EN DOS ENSAYOS CONTROLADOS UTILIZANDO SENSORES REMOTOS”* fue realizado por las señoritas *Simbaña Romero, Erika Vanessa y Tello Borja, Johanna Maite* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 04 de febrero del 2020



Ing. Izar Sinda González

C. C.1756491278

DIRECTOR



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotras, *Simbaña Romero, Erika Vanessa y Tello Borja, Johanna Maite* declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación “*ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPECTRAL DE CHOCHO (LUPINUS MUTABILIS SWEET) POR LA APLICACIÓN DE MÉTODOS DE CONTROL BIOLÓGICO EN DOS ENSAYOS CONTROLADOS UTILIZANDO SENSORES REMOTOS*” es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.



Erika Vanessa Simbaña Romero

C. C.1750553834

Sangolquí, 04 de febrero del 2020

Johanna Maite Tello Borja

Johanna Maite Tello Borja

C. C.1750322339



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

AUTORIZACIÓN

Nosotras, *Simbaña Romero, Erika Vanessa y Tello Borja, Johanna Maite* autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación ***“ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPECTRAL DE CHOCHO (LUPINUS MUTABILIS SWEET) POR LA APLICACIÓN DE MÉTODOS DE CONTROL BIOLÓGICO EN DOS ENSAYOS CONTROLADOS UTILIZANDO SENSORES REMOTOS”*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.



Erika Vanessa Simbaña Romero
Erika Vanessa Simbaña Romero
C. C.1750553834

Sangolquí, 04 de febrero del 2020

Johanna Maite Tello Borja
C. C.1750322339

DEDICATORIA

Con todo mi amor y cariño, mi tesis la dedico a mis padres, quienes son mi motivación para cada día ser mejor y cumplir mi meta. A mi madre, Blanca Romero, por ser un ejemplo de mujer, que nunca se da por vencida, aunque ha tenido tiempos difíciles ha salido a delante, por ser una mujer trabajadora, amorosa, por apoyarme e impulsarme a ser una mujer independiente y por siempre orientarme con sus consejos. A mi Padre, José Simbaña, por ser un padre amoroso, que me ha apoyado siempre, por ser un hombre trabajador y emprendedor, lleno de sueños y ambiciones, por enseñarme que el que no arriesga no gana y que siempre debo esforzarme por cumplir mis sueños.

Erika Simbaña

DEDICATORIA

Dedicado a mis hermanas Paola y Kelly, dos personas llenas de virtudes que me han apoyado y protegido en la vida. Cada día con ellas es un aprendizaje nuevo, cada palabra de ellas ha sido mi calma y luz.

Johanna Tello

AGRADECIMIENTOS

A Dios por siempre guiar mi camino y no dejarme sola en cada paso que he dado, porque cuando he sentido que las cosas van mal, siempre he tenido un soplo de energía para seguir dando lo mejor de mí. A mis padres por su amor infinito, por cuidarme, por ser mi ejemplo, por apoyarme siempre en cada decisión que he tomado, porque han dejado que cometa mis propios errores y han estado a mi lado para levantarme y decirme que la vida es un aprendizaje, que sin derrotas no hay victorias, por enseñarme el valor de la palabra y por los valores que me inculcaron. A mi tía Liliana, por ser mi hermana, mi amiga, mi cómplice, porque siempre he tenido de su parte una palabra de aliento, nunca ha dejado que me sienta sola, porque siempre ha estado a mi lado, en mis traspasos, en mis días tristes y días felices. A mi abuelita Bertha, por ser una segunda madre, cuidarme y guiarme. A una persona especial, que siempre estuvo a mi lado y me brindó un consejo que trato de poner en práctica en cada instancia de mi vida, disfrutar el camino que me lleva a la meta. A mis amigas y amigos por tantos momentos que hemos compartido, porque me llevo los más lindos y valiosos recuerdos, peleas, reconciliaciones, locuras, tristezas y alegrías. A mi equipo de fútbol, por ser el mejor equipo hecho por amigas, por la confianza que me brindaron al dejar que sea su capitana por tantos años, son momentos que los guardo en el corazón. A mi tutor de tesis Ingeniero Izar Sinde por su apoyo y confianza. A mi compañera de tesis Johanna, por todo el trabajo realizado para llegar a la meta y por animarme cuando las cosas se ponían difíciles. Y a todos quienes estuvieron en el camino, se que son muchas personas que estuvieron ahí apoyándome e impulsándome día a día, y si bien no he nombrado a todas, créanme que las llevo en mi corazón y estoy eternamente agradecida.

Erika Simbaña

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, gracias por su amor incondicional, apoyo y enseñarme la disciplina del estudio.

A mis hermanas, ellas han sido un pilar fundamental en mi vida. Gracias por guiarme en este camino.

A mis abuelitos, gracias por acogerme, protegerme y acompañarme en esta etapa de mi vida.

A mis amigos, por estar siempre a mi lado en los momentos de debilidad y alegría.

A mi compañera de tesis, gracias por su dedicación y compromiso en este proyecto.

A mi tutor de tesis, por brindar su conocimiento y amistad, que han permitido llegar a esta meta deseada.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas, que me ha dado tanta sabiduría para mi vida profesional.

Johanna Tello

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
CAPITULO I	17
GENERALIDADES	17
1.1 Antecedentes	17
1.2 Estudios relacionados	19
1.3 Planteamiento del problema	20
1.4 Justificación e importancia	21
1.5 Descripción del área de estudio	22
1.6 Objetivos	24
1.6.1 Objetivo general	24
1.6.2 Objetivos específicos	24
1.7 Metas	25
CAPITULO II	27
MARCO TEÓRICO	27
2.1 Teledetección	27
2.2 Espectro electromagnético	29
2.3 Firma espectral	30
2.4 Índices de vegetación	32
2.5 Fotogrametría	35

2.6 Agricultura de precisión	36
2.7 Lupino o chocho (<i>Lupinus mutabilis sweet</i>)	38
2.8 Diseño experimental y análisis bioestadístico.....	42
2.9 Biomasa.....	46
CAPITULO III	49
METODOLOGÍA	49
3.1 Materiales y equipos.....	50
3.2 Diseño experimental.....	51
3.3 Tamaño de la muestra y posicionamiento de las plantas para los muestreos.....	53
3.5 Datos radiométricos.....	55
3.5.1 Captura de datos radiométricos	55
3.5.2 Procesamiento de datos	57
3.5.3 Generación de índices de vegetación	58
3.5.4 Análisis estadístico.....	58
3.5.4.1 Hipótesis de los índices de vegetación basados en los métodos de control biológico	59
3.5.4.2 Hipótesis de los índices de vegetación basados en genotipos	59
3.5.4.3 Hipótesis de los índices de vegetación basados en estados fenológicos	59
3.5.4.4 Hipótesis de los índices de vegetación basados en zonas edafoclimáticas	60
3.6 Imágenes multiespectrales.....	60
3.6.1 Plan de vuelo para el UAV.....	60
3.6.2 Captura de imágenes multiespectrales	61
3.6.3 Puntos de apoyo fotogramétrico.....	62
3.6.4 Procesamiento de las imágenes	64
3.6.5 Generación de los índices de vegetación.....	64
3.6.6 Análisis estadístico.....	65
3.6.6.1 Hipótesis de los índices de vegetación basados en los métodos de control biológico	65
3.6.6.2 Hipótesis de los índices de vegetación basados en estados fenológicos	66
3.6.6.3 Hipótesis de los índices de vegetación basados en las zonas edafoclimáticas.....	66
3.7 Biomasa.....	66
3.7.1 Generación del MDT y MDS	66
3.7.2 Volumen de la unidad experimental y área total.....	67

3.7.3 Estimación de biomasa de las plantas por Tratamiento	67
3.7.4 Análisis estadístico	69
3.7.4.1 Hipótesis para la estimación de biomasa basada en las zonas edafoclimáticas	69
CAPITULO IV	70
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
4.1 Análisis bioestadístico a partir de firmas espectrales	70
4.1.1 Zona 1	70
4.1.1.1 Análisis de la varianza por genotipos	70
4.1.1.2 Prueba de Fisher por genotipos	73
4.1.1.3 Análisis de la varianza por tratamientos	75
4.1.1.4 Prueba de Fisher por tratamientos	77
4.1.1.5 Análisis de la varianza por estados fenológicos	81
4.1.1.6 Prueba de Fisher por estados fenológicos	83
4.1.2 Zona 2	84
4.1.2.1 Análisis de la varianza por genotipos	84
4.1.2.2 Prueba de Fisher por genotipos	86
4.1.2.3 Análisis de la varianza por tratamientos	88
4.1.2.4 Prueba de Fisher por tratamientos	91
4.1.2.5 Análisis de la varianza por estados fenológicos	94
4.1.2.6 Prueba de Fisher por estados fenológicos	95
4.1.3 Comparación bioestadística entre zonas	96
4.1.3.1 Análisis de la varianza por zonas	97
4.1.3.2 Prueba de Fisher por zonas	99
4.2 Análisis bioestadístico a partir de imágenes multiespectrales	101
4.2.1 Zona 1	101
4.2.1.1 Análisis de la varianza por genotipos y tratamientos	101
4.2.1.2 Análisis de la varianza por estados fenológicos	104
4.2.1.3 Prueba de Fisher por estados fenológicos	105
4.2.2 Zona 2	106
4.2.2.1 Análisis de la varianza por genotipos y tratamientos	106
4.2.2.2 Análisis de la varianza por estados fenológicos	110

4.2.2.3 Prueba de Fisher por estados fenológicos	111
4.2.3 Comparación bioestadística entre zonas	112
4.2.3.1 Análisis de la varianza por zonas	113
4.2.3.2 Prueba de Fisher por zonas.....	116
4.3 Biomasa.....	118
4.3.1 Cálculo del factor de la densidad	118
4.3.2 Volumen de cada unidad experimental por zona	119
4.3.3 Estimación de la biomasa por tratamientos para cada zona	119
4.3.4 Comparación de la biomasa entre zonas	120
4.3.4.1 Análisis de la varianza por zonas	120
4.3.4.2 Prueba de Fisher por zonas.....	121
CAPITULO V	122
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	122
5.1 Conclusiones	122
5.2 Recomendaciones.....	124
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Proyectos relacionados</i>	19
Tabla 2 <i>Fases fenológicas del chocho</i>	39
Tabla 3 <i>Ecuaciones de la suma de cuadrados para la ADEVA</i>	45
Tabla 4 <i>Ecuaciones del cuadrado medio para la ADEVA</i>	45
Tabla 5 <i>Ecuaciones del factor de corrección</i>	45
Tabla 6 <i>Componentes de la tabla ADEVA para un DBCA</i>	46
Tabla 7 <i>Variables de investigación</i>	52
Tabla 8 <i>Tratamientos aplicados</i>	52
Tabla 9 <i>Cronograma para la captura de datos</i>	57
Tabla 10 <i>Fórmulas para el cálculo de los índices de vegetación a partir de firmas espectrales</i> .58	58
Tabla 11 <i>Parámetros de vuelo en Calderón y en el IASA I</i>	60
Tabla 12 <i>Cronograma para la captura de imágenes multiespectrales</i>	61
Tabla 13 <i>Coordenadas de los puntos de control de la zona 1</i>	62
Tabla 14 <i>Coordenadas de los puntos de control de la zona 2</i>	63
Tabla 15 <i>Fórmulas para el cálculo de los índices de vegetación a partir de imágenes RGNIR</i> ..64	64
Tabla 16 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo</i>	70
Tabla 17 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo</i>	71
Tabla 18 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo</i>	72
Tabla 19 <i>Prueba LSD Fisher del NDVI para el genotipo</i>	73
Tabla 20 <i>Prueba LSD Fisher del TNDVI para el genotipo</i>	73
Tabla 21 <i>Prueba LSD Fisher del SRRE para el genotipo</i>	74
Tabla 22 <i>Prueba LSD Fisher del NDRE para el genotipo</i>	74
Tabla 23 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo</i>	75
Tabla 24 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo</i>	76
Tabla 25 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo</i>	76
Tabla 26 <i>Prueba LSD Fisher del NDVI para los tratamientos</i>	78
Tabla 27 <i>Prueba LSD Fisher del TNDVI para los tratamientos</i>	79
Tabla 28 <i>Prueba LSD Fisher del SRRE para los tratamientos</i>	80
Tabla 29 <i>Prueba LSD Fisher del NDRE para los tratamientos</i>	80
Tabla 30 <i>ADEVA de los índices de vegetación</i>	82
Tabla 31 <i>Prueba LSD Fisher del NDVI para los estados fenológicos</i>	83
Tabla 32 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo</i>	84
Tabla 33 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo</i>	85
Tabla 34 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo</i>	85
Tabla 35 <i>Prueba LSD Fisher del NDVI para el genotipo</i>	87
Tabla 36 <i>Prueba LSD Fisher del TNDVI para el genotipo</i>	87
Tabla 37 <i>Prueba LSD Fisher del SRRE y NDRE para el genotipo</i>	87
Tabla 38 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo</i>	88
Tabla 39 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo</i>	89
Tabla 40 <i>ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo</i>	90

Tabla 41 Prueba LSD Fisher del NDVI para los tratamientos.....	91
Tabla 42 Prueba LSD Fisher del TNDVI para los tratamientos.....	92
Tabla 43 Prueba LSD Fisher del SRRE para los tratamientos.....	93
Tabla 44 Prueba LSD Fisher del NDRE para los tratamientos.....	94
Tabla 45 ADEVA de los índices de vegetación	94
Tabla 46 Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para estados fenológicos.....	96
Tabla 47 ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo	97
Tabla 48 ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo.....	97
Tabla 49 ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo.....	98
Tabla 50 Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para el primer muestreo.....	99
Tabla 51 Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para el tercer muestreo	100
Tabla 52 ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo	101
Tabla 53 ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo.....	102
Tabla 54 ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo.....	103
Tabla 55 ADEVA de los índices de vegetación	104
Tabla 56 Prueba LSD Fisher del NDVI para los tratamientos.....	106
Tabla 57 ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo	107
Tabla 58 ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo.....	108
Tabla 59 ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo.....	109
Tabla 60 ADEVA de los índices de vegetación para estados fenológicos	110
Tabla 61 Prueba LSD Fisher para estados fenológicos.....	111
Tabla 62 ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo	113
Tabla 63 ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo.....	114
Tabla 64 ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo.....	114
Tabla 65 Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para el primer muestreo.....	116
Tabla 66 Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para el segundo muestreo	116
Tabla 67 Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para el tercer muestreo.....	117
Tabla 68 Masa de la planta por tratamiento para la zona 1	118
Tabla 69 Masa de la planta por tratamiento para la zona 2	118
Tabla 70 Volumen por tratamiento de la zona 1	119
Tabla 71 Volumen por tratamiento de la zona 2.....	119
Tabla 72 Biomasa por tratamiento para la zona 1	119
Tabla 73 Biomasa por tratamiento para la zona 2	120
Tabla 74 ADEVA de la biomasa por zonas	120
Tabla 75 Prueba LSD Fisher de la biomasa por zonas	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de la zona 1.....	23
Figura 2. Localización geográfica de la zona 2.....	24
Figura 3. Componentes de un sistema de teledetección.....	28
Figura 4. Espectro electromagnético.....	29
Figura 5. Curvas de reflectancia espectral representativas de cada cubierta	30
Figura 6. Factores determinantes de la reflectancia de la hoja	32
Figura 7. Fases fenológicas del chocho.....	39
Figura 8. Vainas y tallo de chocho con antracnosis	40
Figura 9. Diagrama general de la metodología aplicada en el proyecto	50
Figura 10. Distribución de los tratamientos en las unidades experimentales	53
Figura 11. Archivo en formato .xls de las coordenadas de cada planta de la zona 1	54
Figura 12. Plantas georreferenciadas en la zona 1	54
Figura 13. Archivo en formato .xls de las coordenadas de cada planta de la zona 2.....	55
Figura 14. Plantas georreferenciadas en la zona 2	55
Figura 15. Espectroradiómetro.....	56
Figura 16. Toma de datos radiométricos.....	56
Figura 17. Archivo en formato .xls de los valores de reflectancia.....	57
Figura 18. Área y parámetros de vuelo en la aplicación Pix4D.....	61
Figura 19. Posicionamiento de los puntos de control	62
Figura 20. Puntos de control de la zona 1	63
Figura 21. Puntos de control de la zona 2	63
Figura 22. Proceso fotogramétrico.....	64
Figura 23. Ortomosaico calibrado con el software MAPIR.....	65
Figura 24. Aro aproximado del diámetro de la planta	68
Figura 25. Proceso para estimar el peso húmedo y peso seco de una planta	68

RESUMEN

El uso de sensores remotos permite obtener información espectral de un cultivo para la optimización de insumos y la estimación de su rendimiento. El proyecto de investigación se desarrolló en dos zonas con ensayos controlados, zona húmeda (IASA) y zona seca (Calderón). En ambas zonas se cultivaron dos genotipos de chocho I-451 Guaranguito y F3 (ECU-2658 x ECU-8415). Se aplicaron dos métodos de control biológico, la desinfección de semilla por radiación solar y la inoculación de *Bacillus* spp. Para el levantamiento de la información en campo se emplearon herramientas geoespaciales, un espectroradiómetro y una cámara multispectral montada en un UAV. Se generaron los índices de vegetación, NDVI, TNDVI, GNDVI, NDRE, SRRE, SRG y SR, se llevó a cabo un análisis bioestadístico comparativo para determinar las variaciones de la planta de acuerdo con el genotipo, los métodos de control biológicos y las zonas de estudio. Determinando que el mejor tratamiento en la zona húmeda es la desinfección de semilla, mientras que en la zona seca el mejor tratamiento fue la inoculación de *Bacillus* spp. El cultivo tuvo un mejor desarrollo vegetativo en la zona seca debido a las condiciones edafoclimáticas que presenta, sin embargo, la línea de mejora F3 (ECU-2658 x ECU-8415) por su estructura genética obtuvo mejores resultados en las dos zonas. A partir de los modelos digitales generados de las imágenes RGNIR se estimó la biomasa del cultivo y se realizó una comparación entre zonas, siendo la zona seca la que generó mayor biomasa.

PALABRAS CLAVE:

- **MÉTODOS DE CONTROL BIOLÓGICO**
- **ÍNDICES DE VEGETACIÓN**
- **CHOCHO**
- **BIOMASA**

ABSTRACT

The use of remote sensors allows to obtain spectral information of a crop for the optimization of inputs and the estimation of its yield. The research project is in two zones with controlled trials, wet zone (IASA) and dry zone (Calderón). In both areas, two genotypes of chocho I-451 Guaranguito and F3 (ECU-2658 x ECU-8415) were cultivated. Two biological control methods were applied, the disinfection of seed by solar radiation and the inoculation of *Bacillus* spp. Geospatial tools, a spectroradiometer and a multispectral camera mounted on a UAV were used to collect the information in the field. Vegetation indices, NDVI, TNDVI, GNDVI, NDRE, SRRE, SRG and SR were generated, a comparative biostatistical analysis was carried out to determine plant variations according to genotype, biological control methods and areas study. Determining that the best treatment in the wet zone is the disinfection of seed, while in the dry zone the best treatment was the inoculation of *Bacillus* spp. The crop had a better vegetative development in the dry zone due to the edaphoclimatic conditions that presents, however, the improvement line F3 (ECU-2658 x ECU-8415), due to its genetic structure, obtaining better results in both zones. From the digital models generated from the RGNIR images, the biomass of the crop was estimated and a comparison was made between zones, the dry zone being the one that generated the greatest biomass.

KEY WORDS:

- **BIOLOGICAL CONTROL METHODS**
- **VEGETATION INDICES**
- **CHOCHO**
- **BIOMASS**

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

El uso de métodos de control biológico y el uso de tecnologías nuevas en la agricultura pueden ayudar al incremento de la producción de un cultivo, a mejorar la economía de una localidad y no generar un impacto negativo al medio ambiente. Dentro de los métodos de control biológico están los microorganismos, como el *Bacillus* spp. que ayudan en el control de enfermedades y al crecimiento de la planta. Y por otro lado el uso de tecnologías nuevas se relaciona al concepto de agricultura de precisión (AP) que consiste en medir y manejar la variabilidad espacial para aumentar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental (Ortega & Flores, 2013). Con esta técnica se busca reducir el desperdicio de insumos, debido a que estos son aplicados en el momento adecuado y el lugar exacto (García & Flego, 2008). La agricultura de precisión utiliza un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Sistemas de Información Geográfica (SIG), imágenes multiespectrales, y sensores para el monitoreo de cultivos, clima y suelo (Díaz, 2015). Todas estas herramientas permiten evaluar la variabilidad de un cultivo analizando las longitudes de onda que se desarrollan en el infrarrojo cercano y en el espectro visible, con estos datos numéricos se calcula los índices de vegetación que determinan las características y vigorosidad de un cultivo tomando en consideración diferentes factores como el suelo, el clima y la variedad de la semilla (Hlavka et al., 1980; Huesca et al., 2009; Rodríguez & Bullock, 2013). Otro pilar importante dentro de la agricultura de precisión es la estimación de biomasa, que permite valorar el rendimiento del cultivo a lo largo del ciclo de crecimiento, proporcionando información útil acerca de la situación

específica de infecciones causadas por hongos o malezas que afectan al follaje del cultivo permitiendo tomar decisiones de manera oportuna (Moran, Inoue, & Barnes, 1997).

En la actualidad los granos andinos han presentado un incremento en su demanda, especialmente el chocho ya que puede mejorar las condiciones de vida de los agricultores por su rentabilidad y comercialización (Guaytarilla & Falconí, 2014). En Ecuador, la seguridad alimentaria para en el año 2001 fue un tema relevante tratado por el Gobierno que junto con el apoyo de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación planteó un programa para impulsar la agricultura sostenible del chocho (*Lupinus mutabilis sweet*) y de otros granos Andinos (Jacobsen & Sherwood, 2002).

El chocho andino, tarwi o lupino (*Lupinus mutabilis sweet*) es una planta leguminosa que se cultiva en casi todos los valles interandinos a partir de los 1500 msnm, se distribuye desde Colombia hasta el norte de Argentina, sin embargo, la producción de este cultivo toma mayor importancia en Ecuador, Perú y Bolivia (Jacobsen & Sherwood, 2002). A pesar de la importancia de este grano, la producción de chocho no satisface la demanda en Ecuador ya que se ve limitada por enfermedades fúngicas, una de las principales enfermedades que ataca al chocho es la antracnosis, causada por el patógeno *Colletotrichum acutatum*, esta enfermedad por lo general proviene de la siembra de semillas infectadas, debido mala selección de semillas por parte de los agricultores y el intercambio de estas en las redes locales, por lo que se requiere implementar tecnologías nuevas para desarrollar una agricultura sostenible (Censo Nacional Agropecuario, 2003; Falconí et al., 2013).

1.2 Estudios relacionados

El interés por buscar técnicas amigables con el medio ambiente para desarrollar una agricultura sostenible ha tomado mayor impulso en los últimos años, realizando estudios que integren técnicas geoespaciales, el uso de UAV, índices de vegetación, entre otros, que permitan caracterizar los diferentes tipos de cultivos.

Debido a la creciente demanda de granos andinos, entre estos el lupino, se han desarrollado estudios que permitan detectar enfermedades de los cultivos a tiempo y también para determinar su valor nutritivo. En la **Tabla 1** se mostrarán los trabajos relacionados con agricultura de precisión y cultivos de chocho.

Tabla 1
Proyectos relacionados

Autores	Tema	Lugar/Año de Publicación
Falconí, C., Visser, R., & van Heusden, A.	Phenotypic, Molecular and Pathological Characterization of Colletotricum acutatum Associate with Andean Lupine and Tamarillo in the Ecuador Andes	Sangolquí – Ecuador 2013
Díaz, J.	Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión.	Madrid - España, 2015
Huesca, M., Litago, J., Escribano, P., Palacios, A., & Merino, S.	Utilidad del índice espectral para caracterizar tipos de vegetación en zonas bioclimáticas distintas mediante análisis de series de tiempo	Madrid- España 2009
Godoy, L., & Luna, P.	Análisis y caracterización espectral del chocho (lupinus mutabilis sweet) por los efectos de tratamientos de desinfección de semilla	Sangolquí – Ecuador 2019
Yáñez-Mendizábal, V. & Falconí, C.	Efficacy of Bacillus spp. to biocontrol of anthracnose and enhance plant growth on Andean Lupin seeds by lipopeptide production	Ecuador - 2018
Gil-Docampo, M. L., Arza-García, M., Ortiz-Sanz, J., Martínez-Rodríguez, S., Marcos-Robles, J. L., & Sánchez-Sastre, L. F.	Above-ground biomass estimation of arable crops using UAV-based SfM photogrammetry. Geocarto International, 1-13.	Valladolid – España 2019

1.3 Planteamiento del problema

En la actualidad para la agricultura se han implementado nuevas técnicas de teledetección que permiten caracterizar el cultivo mediante su comportamiento espectral, no obstante, en Ecuador el desconocimiento por parte de los agricultores de estas técnicas aplicadas a la mejora de la agricultura ocasiona que sigan utilizando técnicas tradicionales, las mismas que muchas veces no detectan a tiempo las enfermedades, afectando a la producción agrícola de granos andinos del país por la disminución del rendimiento de los cultivos. Este rendimiento está determinado por varios factores: el clima, la ubicación geográfica de la zona, el control de plagas y enfermedades (Lobell, Cassman, & Field, 2009; Nguema et al., 2013).

Uno de los granos andinos con mayor importancia en Ecuador es el chocho, sin embargo, la aplicación de tecnologías como UAV, sensores de cultivo y otras herramientas geoespaciales que permitan caracterizar este cultivo han sido poco implementadas, teniendo como consecuencia que la información espectral sea limitada.

Con el propósito de dar solución al problema y basándose en el principio de que un análisis espectral en los diferentes estados fenológicos proporciona una evaluación cuantitativa de la capacidad del cultivo para interceptar la radiación y estimar su rendimiento (Mandal et al., 2007); es posible realizar una estimación de biomasa y una caracterización de la reflectancia espectral desde el rango visible hasta el infrarrojo cercano de chocho durante sus etapas de desarrollo, aplicando métodos de control biológico en dos zonas con diferentes condiciones climáticas, utilizando tecnologías geoespaciales.

1.4 Justificación e importancia

El rendimiento del cultivo al ser impulsor crítico del precio de los alimentos y la expansión de las tierras para labranza se debe monitorear y gestionar adecuadamente de tal manera que, con el uso de los sensores remotos, análisis geoespaciales, modelos de simulación, experimentos en campo y validación en invernadero, se optimice la producción agrícola, tanto la cantidad como la calidad de los productos (Lobell, Cassman, & Field, 2009; Gebbers & Adamchuk, 2010).

Un buen estimador del rendimiento e indicador de la vitalidad de un cultivo es la biomasa. Para obtener una predicción precisa y eficiente de biomasa los métodos tradicionales tienen generalmente un costo elevado e involucran un muestreo destructivo en un área geográfica limitada, por estas razones, en la actualidad el uso de sensores remotos es una alternativa para estimar la biomasa, debido al costo relativamente bajo de los datos obtenidos con estas técnicas y la capacidad de recopilar información fácilmente en áreas de difícil acceso (Bortolot & Wynne, 2005; Popescu, 2009; Bendig et al., 2014; Ballesteros, Ortega, Hernandez, & Moreno, 2018).

Los cultivos de las zonas andinas de Sudamérica tienen gran importancia ecológica, socioeconómica y nutricional. Uno de los alimentos nativos con elevado contenido de proteína (41 a 51%) y de grasa orgánica (14 a 24%) es el chocho (*Lupinus mutabilis sweet*), formando parte de la alimentación de los pobladores urbanos debido a su oferta de proteína relativamente barata. Desde el punto de vista agrícola, el chocho es fijador de nitrógeno atmosférico, factor que restituye la fertilidad del suelo, y aporta gran cantidad de materia (Jacobsen & Mujica, 2006). La alta demanda de este grano ofrece mejores condiciones de vida para los agricultores debido a la rentabilidad del cultivo (Guaytarilla & Falconí, 2014).

Para obtener información sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos de chocho que mejoren la precisión del monitoreo del rendimiento, se puede utilizar técnicas de teledetección como sensores de cultivos y aerotransportados que permitan realizar un análisis espectral de la planta, teniendo en cuenta que los caracteres morfológicos del chocho están influenciados por el genotipo, las condiciones climáticas y el manejo agronómico (Patel et al., 1985; Pierce & Nowak, 1999; Jacobsen & Mujica, 2008; Bendig et al., 2014).

1.5 Descripción del área de estudio

La investigación se ejecutó en dos zonas de la provincia de Pichincha, tomando en cuenta que cada zona presenta diferentes condiciones edafoclimáticas.

La primera zona de estudio (de ahora en adelante zona 1), considerada como zona húmeda con una precipitación media anual de 1300 mm se ubica en el campus IASA I (Hacienda “El Prado”) de la Universidad de las Fuerzas Armadas, a una altitud de 2748 msnm, con una temperatura media anual de 14°C y un clima de tipo ecuatorial mesotérmico húmedo (ver *Figura 1*).

La segunda zona de investigación (de ahora en adelante zona 2), considerada como zona seca con una precipitación media anual de 500 mm se encuentra en el sector San Juan en la parroquia de Calderón, a una altitud de 2610 msnm, con una temperatura media anual de 15°C (Loachamín, 2017). Además, presenta un clima cálido de tipo ecuatorial mesotérmico seco (ver *Figura 2*).

Basado en la cartografía del Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica sobre Órdenes de Suelos del Ecuador a escala 1:25.000, el tipo de suelo que corresponde a la zona 1 pertenece al orden molisol, que presenta un horizonte superficial rico en materia orgánica con propiedades físicas y químicas favorables para el desarrollo radicular. El tipo de suelo que presenta la zona 2 corresponde al orden entisol, que posee poca evidencia de formación de horizontes edafogénicos con poca materia orgánica (SIGTIERRAS, 2017).

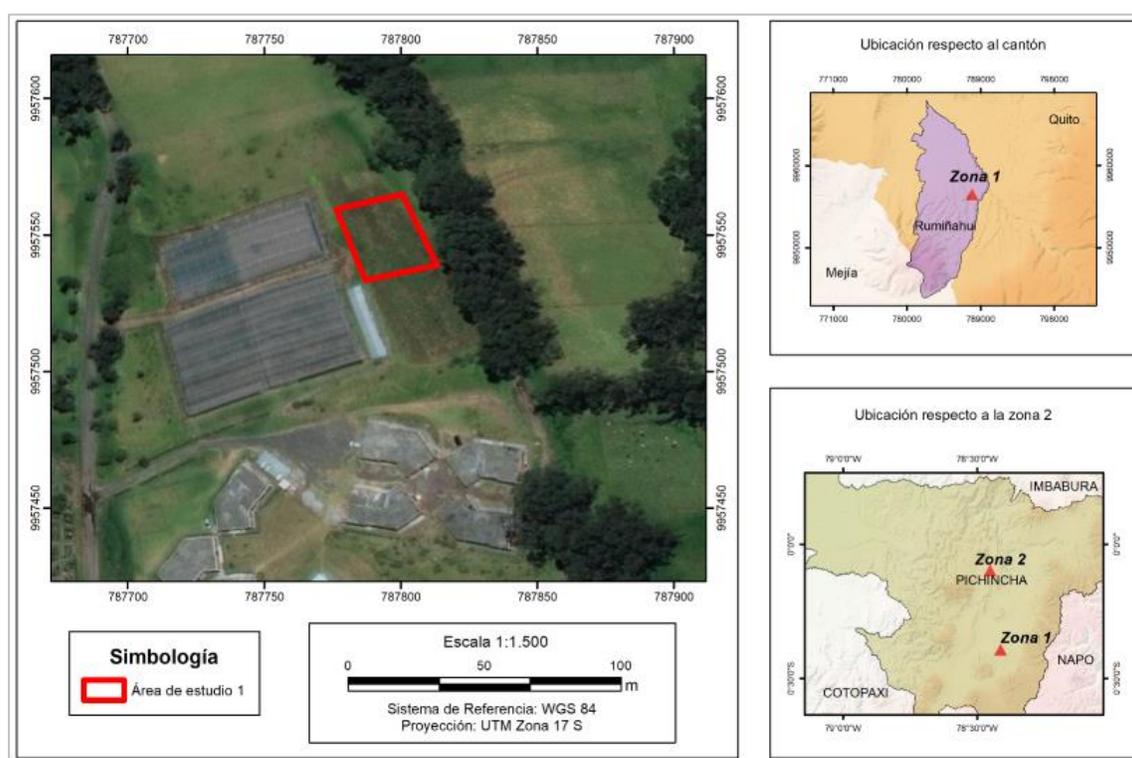


Figura 1. Localización geográfica de la zona 1

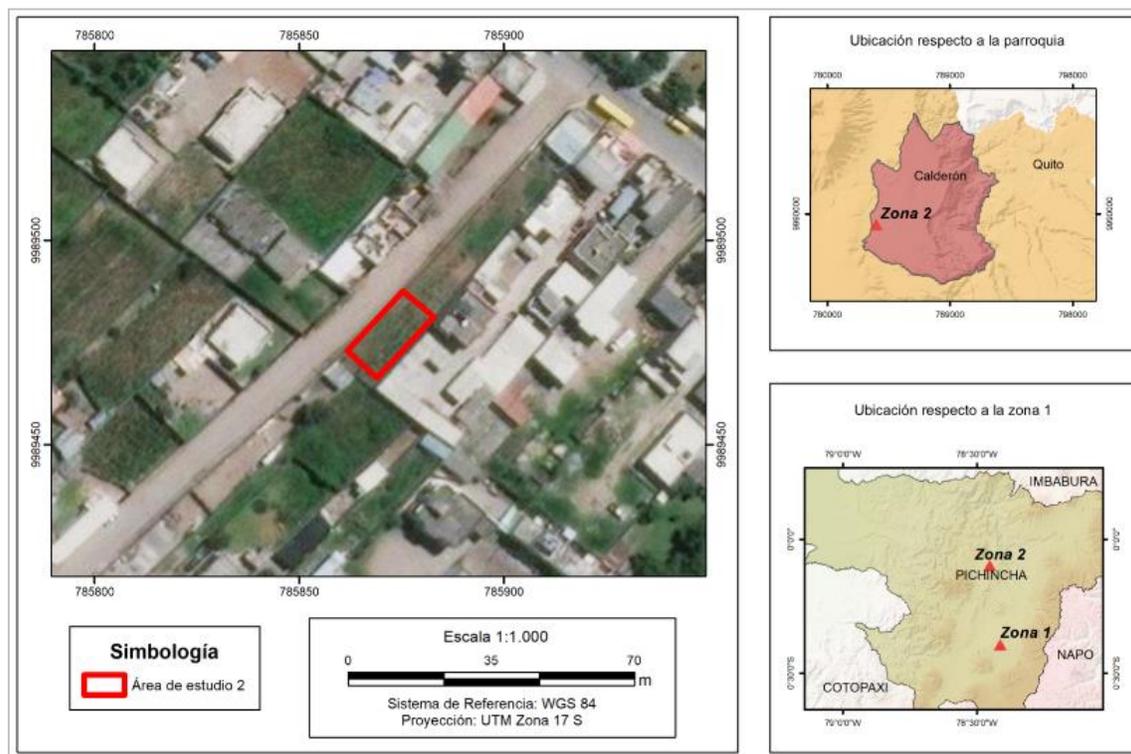


Figura 2. Localización geográfica de la zona 2

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Estimar la biomasa y analizar la variabilidad espectral por la aplicación de métodos de control biológico en el cultivo de chocho (*Lupinus mutabilis sweet*) para su monitoreo en dos ensayos controlados.

1.6.2 Objetivos específicos

- Obtener datos espectrales de la línea de mejora de chocho F3 (ECU-2658 x ECU-8415) y el genotipo I-451 Guaranguito, mediante un espectralradiómetro en dos ensayos controlados.

- Capturar datos radiométricos de la línea de mejora de chocho F3 (ECU-2658 x ECU-8415) y el genotipo I-451 Guaranguito, mediante un sensor multiespectral aerotransportado en UAV en dos ensayos controlados.
- Generar índices de vegetación NDVI, TNDVI, SR-RE y NDRE y analizar estadísticamente los resultados obtenidos por espectroscopia e imágenes aéreas de la línea de mejora de chocho F3 (ECU-2658 x ECU-8415) y el genotipo I-451 Guaranguito bajo inoculación de *Bacillus* spp. y desinfección de semilla en dos ensayos controlados.
- Realizar un análisis bioestadístico comparativo de los datos radiométricos entre la línea de mejora de chocho F3 (ECU-2658 x ECU-8415) y el genotipo I-451 Guaranguito bajo métodos de control biológico en dos ensayos controlados.
- Estimar la biomasa del cultivo considerando los diferentes tratamientos en los dos ensayos controlados.

1.7 Metas

- Un registro de respuestas espectrales obtenidas de los genotipos de chocho por desinfección de semilla cada 30 días de las dos zonas de estudio.
- Un registro de respuestas espectrales obtenidas de los genotipos de chocho bajo inoculación de *Bacillus* spp. en la etapa de desarrollo y floración de las dos zonas de estudio.
- Imágenes multiespectrales tomadas con UAV de los estados fenológicos del cultivo para la línea de mejora de chocho F3 (ECU-2658 x ECU-8415) y el genotipo I-451 Guaranguito en las zonas de estudio.
- Índices de vegetación de los estados fenológicos del cultivo para cada uno de los genotipos y zonas de estudio.

- Una tabla comparativa del comportamiento espectral de dos genotipos de chocho en sus diferentes estados fenológicos contrastando las dos zonas climáticas, seca y húmeda, bajo inoculación de *Bacillus* spp. y desinfección de semilla.
- Una tabla del análisis bioestadístico de los datos radiométricos obtenidos de los ensayos correspondientes a los dos genotipos bajo inoculación de *Bacillus* spp. y desinfección de semilla en las dos zonas climáticas.
- Un modelo digital del terreno y un modelo superficial del cultivo en la etapa de envainamiento de los dos ensayos controlados.
- Una tabla comparativa de la estimación de la biomasa de los dos ensayos controlados.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Teledetección

La teledetección se define como la técnica que permite obtener información de la superficie terrestre a través de imágenes adquiridas desde sensores aéreos o espaciales, utilizando radiación electromagnética reflejada o emitida desde las características de la tierra en una o más regiones del espectro electromagnético (Chuvieco, 2010; Campbell & Wynne, 2011).

Estos sensores se pueden agrupar principalmente en dos tipos: activos y pasivos. Los sensores activos emiten un pulso de energía, que es medido al ser reflejado en la dirección del detector; entre los sensores activos más comunes están el radar y el lidar. Los sensores pasivos no generan un pulso de energía, miden la radiación que llega al detector de la energía proveniente de una fuente externa; entre los sensores pasivos se encuentran los sensores fotográficos, electro-ópticos y de antena (Turner et al., 2003; Wang & Weng, 2013).

En un sistema de teledetección, como se observa en la **Figura 3**, la energía se puede originar de varias fuentes (1), ya sea natural o artificial. Esta energía se propaga a través de la atmósfera e interactúa con la superficie terrestre (2). La radiación electromagnética puede ser reflejada o emitida según las características físicas de la superficie (3) y transmitida a través de la atmósfera al sensor montado en una plataforma (4). Estas señales de energía registradas por el sensor son codificadas y enviadas a un sistema de recepción, dando como resultado la generación de datos en forma gráfica y/o digital (5). Esta información con otros datos de referencia se analiza e interpreta con la integración de otras tecnologías geoespaciales, como los Sistema de Información

Geográfica, los Sistema de Posicionamiento Global (GNSS) y el mapeo móvil, permitiendo al usuario generar estrategias para la gestión del territorio u otras aplicaciones (6) (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004; Joseph, 2005; Chuvieco, 2010; Richards, 2013; Wang & Weng, 2013).

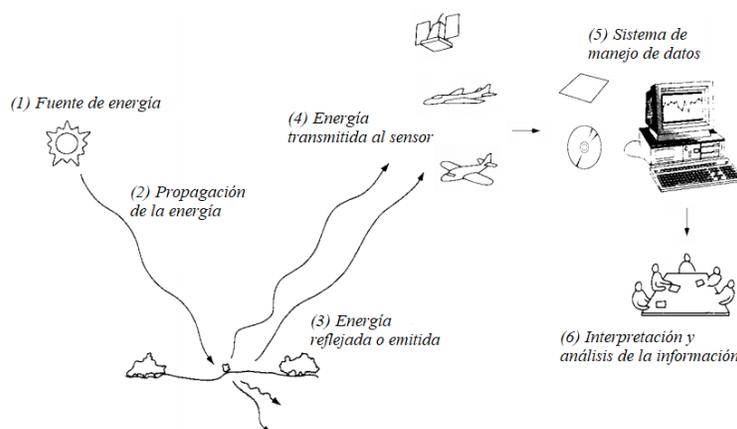


Figura 3. Componentes de un sistema de teledetección

Fuente: (Modificado de Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004)

La resolución de un sistema sensor es la capacidad del sensor para discriminar información de detalle, resultado del efecto combinado de sus componentes (Chuvieco, 2010). Esta información se define por distintos tipos de resolución: espacial, espectral, temporal, radiométrica y angular.

La resolución espacial se refiere al límite sobre cuán pequeño puede ser el objeto para ser distinguido en la imagen (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004). La resolución espectral se caracteriza por el número y ancho de bandas espectrales ubicados a lo largo del espectro (Herold, Gardner, & Roberts, 2003). La capacidad de ver el mismo objeto en condiciones similares a intervalos regulares se lo conoce como resolución temporal (Joseph, 2005). La resolución radiométrica se asocia a la sensibilidad del sensor, a la discriminación de los objetos en función de las variaciones de reflectancia. En un equipo digital, la resolución radiométrica se identifica con el rango posible de valores que almacena el sensor medido como el número de bits (Joseph, 2005;

Chuvieco, 2010). La resolución angular es la habilidad del sensor para observar la misma zona desde distintos ángulos (Chuvieco, 2010).

2.2 Espectro electromagnético

El sensor registra las señales de radiación electromagnética como una función de la longitud de onda dentro del espectro electromagnético (Turner et al., 2003).

El espectro electromagnético es el continuo de energía que varía de metros a nanómetros en longitud de onda, viaja a la velocidad de la luz y se propaga a través de un vacío (Sabins, 2007). El espectro electromagnético se divide en regiones de longitud de onda, desde rayos gamma de longitudes de onda muy cortas hasta la región radio con longitudes de onda largas (Sabins, 2007). Las principales bandas empleadas en la actualidad se pueden clasificar en región óptica y microondas y se detectan con diferentes tecnologías. La región óptica se origina de la energía reflejada y emitida por la superficie terrestre, abarca la región visible y la región infrarroja. La región visible se subdivide en tres bandas, azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y roja (0.6 a 0.7 μm); y la región infrarroja varía generalmente entre 0.7 a 14 μm . La región microondas varía entre longitudes de onda de 1mm a 1 m. Esta amplia gama de radiaciones se observa en la **Figura 4** (Turner et al., 2003; Sabins, 2007).

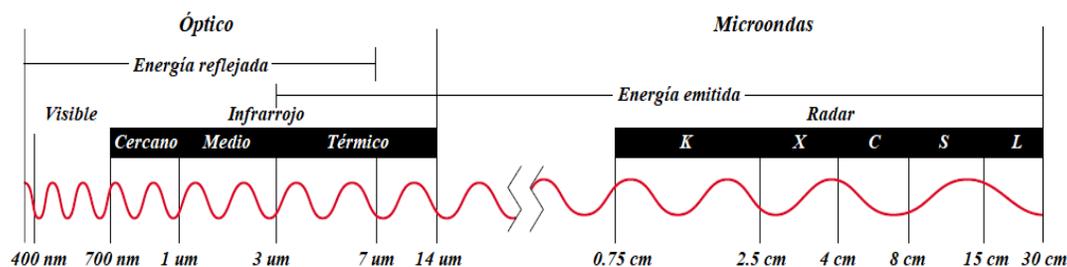


Figura 4. Espectro electromagnético

Fuente: (Turner et al., 2003)

2.3 Firma espectral

Dependiendo del ancho de las bandas del espectro electromagnético detectado por el sensor se obtiene un patrón de respuestas espectrales de las características de la superficie terrestre, a lo que se ha denominado firmas espectrales. Las firmas se basan en como el objeto refleja o emite la radiación electromagnética, razón por la cual no son completamente deterministas, no es un patrón absoluto y único. Estas respuestas espectrales distintivas de cada objeto con frecuencia permiten una evaluación del tipo y condición de las características del mismo (Turner et al., 2003; Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004; Joseph, 2005).

Como se observa en la **Figura 5**, la firma espectral es característica de cada tipo de cubierta con intervalos crecientes y decrecientes dependiendo de la longitud de onda.

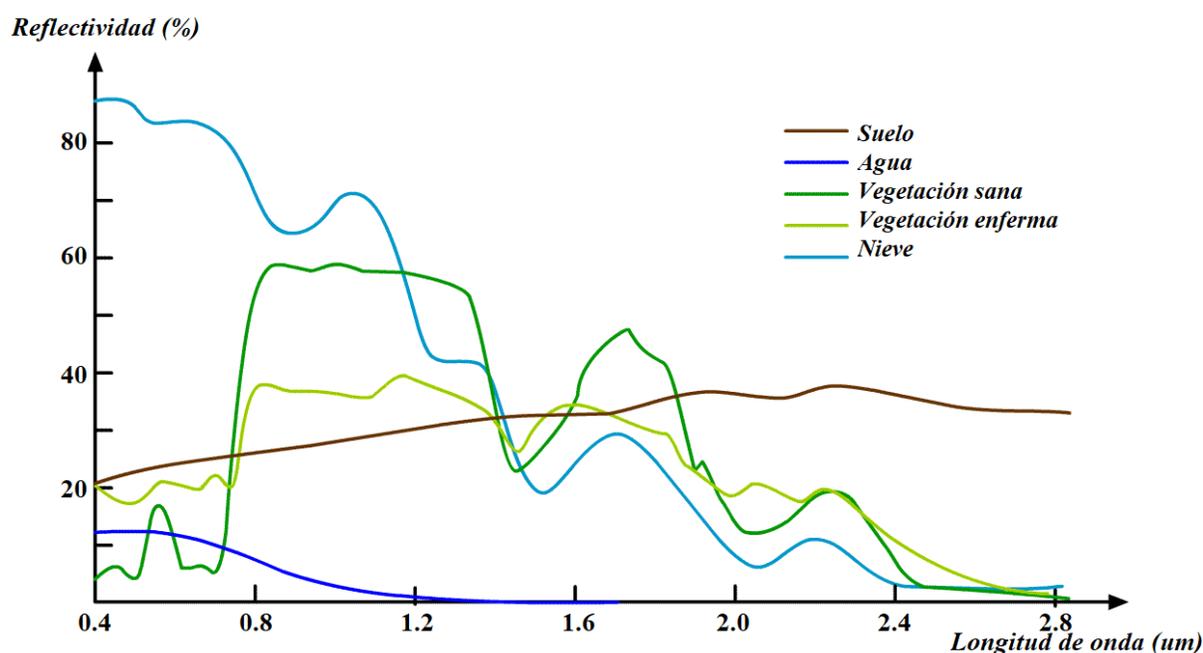


Figura 5. Curvas de reflectancia espectral representativas de cada cubierta
Fuente: (Piazzese & Oñate, 2018)

Para una vegetación saludable generalmente la curva de reflectancia espectral presenta un comportamiento no periódico con picos y valles notorios en ciertas longitudes de onda, esto depende fundamentalmente del contenido de humedad, la etapa de desarrollo y salud de la planta (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004; Schowengerdt, 2006).

En la región del espectro visible se observa una baja reflectividad resultado del efecto absorbente de los pigmentos de la hoja. La clorofila, un pigmento vegetal que se encuentra en mayor cantidad en la hoja, absorbe fuertemente la energía en las bandas azul y roja, alrededor de 0.45 y 0.67 μm , respectivamente. En la banda verde cerca de 0.55 μm el efecto de absorción es menor, generando un pico de reflectividad. Lo que causa el color verde que percibe el ojo humano en relación con una vegetación sana (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004).

En la región del infrarrojo cercano (IRC), en el rango de 0.7 a 1.3 μm la reflectividad aumenta drásticamente debido a la baja absorción de la clorofila y a la estructura celular de la hoja, donde ocurre la dispersión de la luz solar, ya que el interior de la hoja es un laberinto de espacios de aire y células llenas de agua, lo que genera reflejos internos de las células de forma irregular (Gandhi, Parthiban, Thummalu, & Christy, 2015; Yengoh, Dent, Olsson, Tengberg, & Tucker III, 2016). A partir de 1.3 μm , en la porción del infrarrojo de onda corta (del inglés, Short Wave Infrared SWIR), la reflectancia está inversamente relacionada con el contenido de agua presente en la hoja. Como se observa en la **Figura 6**, esta región muestra máximos y mínimos relativos debido a la absorción del agua. Los mínimos resultan en 1.4, 1.9 y 2.7 μm , ya que el agua absorbe fuertemente en estas longitudes de onda (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004).

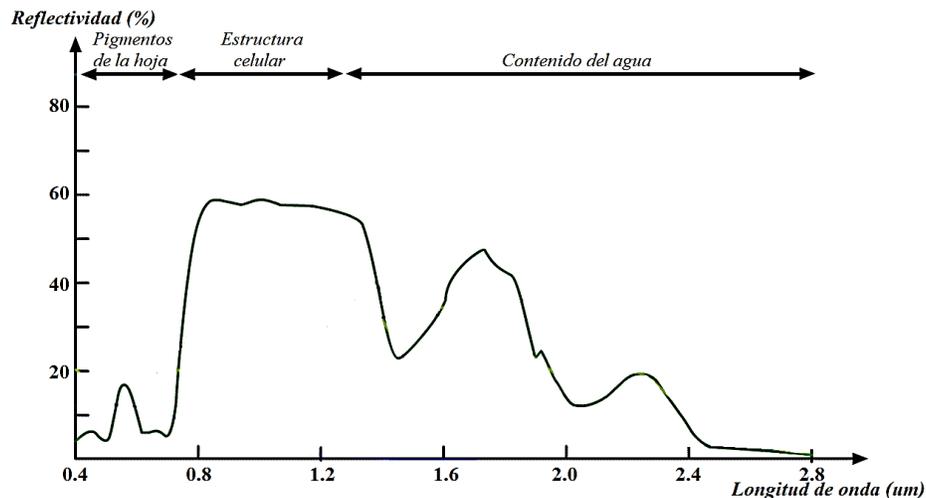


Figura 6. Factores determinantes de la reflectancia de la hoja
Fuente: (Chuvienco, 2010)

Cuando la vegetación sufre alguna forma de estrés, tal como sequía, escasez de nutrientes y senescencia, entre otras, el contenido de clorofila tiende a disminuir dando como resultado que la reflectividad disminuya en el IRC y el efecto absorbente descienda en la banda azul y roja (Zhang, Qin, Liu, & Ustin, 2003; Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004; Kempeneers, De Backer, Debruyn, Coppin, & Scheunders, 2005).

2.4 Índices de vegetación

Las imágenes adquiridas con teledetección proporcionan radiación espectral en diferentes regiones del espectro electromagnético, lo que permite caracterizar a la vegetación (Vicente-Serrano et al., 2016). Sin embargo, existen factores que afectan a la reflectancia espectral, como las condiciones atmosféricas, las propiedades del suelo, la iluminación solar y la geometría de visualización del sensor, para reducir el efecto de estos factores se han desarrollado varios índices de vegetación (Yengoh, Dent, Olsson, Tengberg, & Tucker III, 2016).

Los índices de vegetación son transformaciones espectrales de dos o más bandas que permiten comparaciones espaciales y temporales significativas de la actividad de la vegetación al monitorear sus parámetros estructurales, fenológicos y biofísicos (Huete et al., 2002; Gandhi, Parthiban, Thummalu, & Christy, 2015).

Uno de los principales índices es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que se basa en el contraste existente entre las bandas IRC y rojo, es decir, el hecho de que la vegetación verde sana tenga baja reflectancia roja pero alta reflectancia IRC (Pettorelli et al., 2011; Roy et al., 2016).

El NDVI mide la fracción de radiación fotosintéticamente activa que es absorbida por la vegetación para obtener energía en la fotosíntesis (Fu & Burgher, 2015; Yengoh, Dent, Olsson, Tengberg, & Tucker III, 2016). Este índice se correlaciona con propiedades físicas del dosel, como la biomasa, la productividad de la vegetación y el índice de área foliar (Carlson & Ripley, 1997; Jiang et al., 2006; Tian et al., 2016).

Se expresa como la relación entre la diferencia y la suma de la reflectancia espectral obtenida en las regiones infrarrojo cercano y visible roja (Rouse, Haas, Schell, & Deering, 1974; Gascon et al., 2016), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{R_{IRC} - R_{Rojo}}{R_{IRC} + R_{Rojo}} \quad (1)$$

El NDVI varía en el intervalo de (-1, +1), con un máximo teórico de 1 y asintóticamente no lineal a medida que se acerca a 1 (Raynolds, Comiso, Walker, & Verbyla, 2008). Los valores cercanos a cero e inferiores representan zonas sin vegetación, como agua, hielo, nieve, nubes y

superficies áridas (Pettorelli et al, 2011; Fu & Burgher, 2015). Los valores positivos más altos corresponden a una vegetación con mayor verdor, mientras que los valores más pequeños representan una vegetación con bajo contenido de clorofila y cambios en la estructura interna de la hoja, es decir, reflejan el estrés del dosel, ya que a mayor contenido de clorofila mayor será el índice (Gu et al., 2008; Yengoh, Dent, Olsson, Tengberg, & Tucker III, 2016).

Para evitar trabajar con valores negativos del NDVI y la posibilidad de que la varianza sea proporcional a los valores medios se calcula una transformación de raíz cuadrada con una constante arbitraria, denominado como Transformed Normalized Difference Vegetation Index (TNDVI), correlacionándose de igual forma con las propiedades físicas del dosel que el NDVI (Rouse, Haas, Schell, & Deering, 1974; Tucker, 1979; Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004):

$$TNDVI = \sqrt{\frac{R_{IRC} - R_{Rojo}}{R_{IRC} + R_{Rojo}} + \frac{1}{2}} \quad (2)$$

Un índice similar al NDVI que permite evaluar varias condiciones de la vegetación, es aquel que utiliza la región del borde de rojo, este índice se denomina Simple Ratio Red Edge (SR-RE). El SR-RE utiliza la relación entre la reflectancia del infrarrojo cercano y del borde de rojo para estimar de forma no destructiva el contenido de clorofila a nivel de hoja (Vogelmann, Rock, & Moss, 1993; Gitelson & Merzlyak, 1994; Datt, 1999; Adamczyk & Osberger, 2015), se expresa con la siguiente ecuación:

$$SR - RE = \frac{R_{IRC}}{R_{Borde\ de\ rojo}} \quad (3)$$

El índice Normalized Difference Red Edge Index (NDRE) es un indicador de contenido de clorofila y del estado de nitrógeno, se calcula de manera similar al NDVI, reemplazando la banda roja por la banda de borde de rojo (Barnes et al., 2000; Fitzgerald et al., 2006; Li et al., 2014), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$NDRE = \frac{R_{IRC} - R_{Borde\ de\ rojo}}{R_{IRC} + R_{Borde\ de\ rojo}} \quad (4)$$

2.5 Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que determina la geometría tridimensional de los objetos, es decir su ubicación, forma y tamaño, en base a la medición y el análisis de sus imágenes bidimensionales (Jiang, Jáuregui, & White, 2008; Kraus, 2011).

Para la reconstrucción métrica a partir de imágenes, son fundamentales ciertos procesos fotogramétricos, estos son: la calibración de la cámara, la orientación interior y exterior de la imagen (Remondino, Barazzetti, Nex, Scaioni, & Sarazzi, 2011; Raczynski, 2017). La orientación de la imagen se refiere a la determinación de parámetros que describen modelos fotogramétricos específicos para mapear puntos, líneas y áreas de un sistema de coordenadas a otro. La orientación interior es la reconstrucción individual de los rayos que impresionaron la imagen, por esto es preciso conocer los parámetros geométricos de la cámara: distancia focal calibrada, las coordenadas del punto principal y los coeficientes de distorsión de la lente. La orientación exterior define la posición y altitud de la cámara en relación con el sistema de coordenadas del objeto en el momento de la adquisición de la imagen (Heipke, 1997; Grussenmeyer & Khalil, 2002; Fiore, 2001; Karjalainen, Hyyppä, & Kuittinen, 2006; Matías Bejarano, 2013; Sánchez García, 2019).

Otro proceso fotogramétrico es la aerotriangulación, que implica la transformación de las coordenadas de la imagen en coordenadas del terreno a través de puntos de apoyo que deben ser visibles en el conjunto de imágenes (Mesas-Carrascosa et al., 2016; Benjamin, O'Brien, Barnes, Wilkinson, & Volkmann, 2017).

Como productos principales de la fotogrametría se obtiene los modelos digitales del terreno y superficie, ortofotos, reconstrucción y clasificación 2D y 3D de objetos para mapeo o aplicaciones temáticas (Baltsavias, 1999; Raczynski, 2017). La generación de ortofoto tiene como objetivo eliminar el desplazamiento del relieve de las imágenes y la variación de escala, mostrando a los objetos en sus ubicaciones geográficas verdaderas y con una escala uniforme (Habib, Kim, & Kim, 2007).

2.6 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión se define como un sistema de gestión agrícola basado en la recopilación y procesamiento intensivo de información teniendo en cuenta la variabilidad espacial y temporal, con el fin de optimizar los insumos para la producción de cultivos, mejorar el rendimiento del cultivo y la calidad ambiental (Pierce & Nowak, 1999; Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004; Aubert, Schroeder, & Grimaudo, 2012; Mulla, 2013).

La agricultura de precisión comprende un conjunto de tecnologías que combina: Sistema de Posicionamiento Global, Sistemas de Información Geográfica, sensores de contacto o remotos, entre otros; que al converger permiten adquirir, analizar y gestionar cantidades masivas de datos espaciales y temporales relacionados con la producción agrícola, enfocándose principalmente en alcanzar una agricultura sostenible, de bajos insumos y de alta eficiencia. Para obtener información sobre la variabilidad del suelo y los cultivos se utiliza un enfoque basado en mapas, que examina

los patrones espaciales y temporales de los índices de vegetación (Pierce & Nowak, 1999; Basso, Ritchie, Pierce, Braga, & Jones, 2001; Zhang, Wang, & Wang, 2002; Gebbers & Adamchuk, 2010).

Una de estas tecnologías es el Sistema de Posicionamiento Global o GPS (Global Positioning System) que permite determinar la posición (latitud, longitud y altitud) en cualquier lugar de la tierra con un alto grado de precisión (Borgelt, Harrison, Sudduth, & Birrell, 1996; Stafford, 2000). El GPS registra la variabilidad en el campo como datos codificados geográficamente, determinado y registrando la posición correcta continuamente. Para aplicaciones agrícolas más específicas en las parcelas se requiere un mayor nivel de precisión, a nivel de centímetro, por lo que se utiliza el método de posicionamiento en tiempo real RTK. Este método permite un mapeo geoespacial de plantas, considerándolas individualmente, lo que permitiría el control de malezas intrahilera sin dañar el cultivo, aplicación precisa de insumos químicos a cada planta y medición del vigor de la planta (Neményi, Mesterházi, Pecze, & Stépán, 2003; Sun et al., 2010; Perez-Ruiz, Slaughter, Gliever, & Upadhyaya, 2012).

En la última década, la implementación de nuevos sensores e instrumentos en el sector agrícola ha ofrecido mejores soluciones para el manejo y monitoreo de cultivos. Uno de ellos son los sensores de cultivo, que ofrecen grandes posibilidades para adquirir de manera rápida y fácil mediciones precisas en campo. Un ejemplo de esto, es el espectroradiómetro, que a través de una entrada de fibra óptica registra datos en más de 1000 bandas simultáneamente, permitiendo evaluar diferentes índices de vegetación. Otra de estas tecnologías es la plataforma UAV (del inglés Unmanned Aerial Vehicle) o vehículo aéreo no tripulado, que equipado con GPS y cámaras digitales es capaz de proporcionar imágenes multispectrales de alta resolución espacial y temporal, especialmente donde se deben monitorear pequeñas áreas productivas. El desarrollo de

esta plataforma ofrece la posibilidad de estudiar al cultivo desde otro punto de vista al usual, observando algunas peculiaridades de la cobertura vegetal apenas visible desde el suelo (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004; Grenzdörffer, Engel, & Teichert, 2008; Eisenbeis, 2009; Primicerio et al., 2012; Candiago, Remondino, De Giglio, Dubbini, & Gattelli, 2015).

2.7 Lupino o chocho (*Lupinus mutabilis sweet*)

El chocho andino, tarwi o lupino (*Lupinus mutabilis sweet*), es una planta leguminosa herbácea antigua típica de los andes que crece de manera vertical y puede alcanzar desde 0.80 m hasta 2 m de altura dependiendo de la zona en la que se cultive; su raíz es de gran grosor, pivotante y puede alcanzar una profundidad de hasta dos metros, se cultiva generalmente en todos los valles interandinos a partir de los 1500 msnm y se distribuye en Colombia, Perú, Bolivia y Ecuador, en este último especialmente en Tulcán, Riobamba, Loja, Cotopaxi, Chimborazo y Cuenca (Guaytarilla & Falconí, 2014; Tapia, 2015).

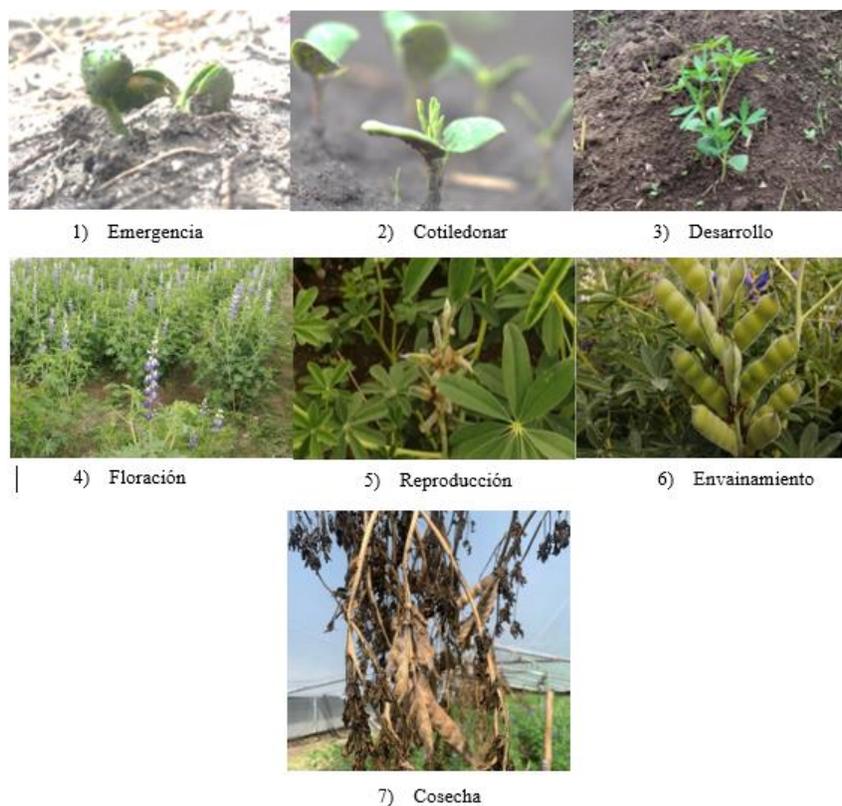
La productividad de un cultivo está estrechamente relacionada con las condiciones edafoclimáticas de la zona, es decir, con la humedad, temperatura, precipitación, pH y el tipo de suelo. El rendimiento del chocho es altamente influenciado por estas condiciones que pueden modificar las características morfológicas de la planta. Aunque esta leguminosa se adapte a climas templados, ni demasiados secos o cálidos, es relativamente susceptible a las heladas, y en regiones secas o con sequías, las plantas son más pequeñas y maduran antes (Jacobsen & Mujica, 2008)

Según Aguero (2018), una fase fenológica es el tiempo que tarda un cultivo en dar una manifestación biológica, es decir, el período en el que aparecen, se transforman o desaparecen órganos de las plantas. El cultivo de chocho presenta 7 fases fenológicas (ver **Tabla 2** y **Figura 7**).

Tabla 2*Fases fenológicas del chocho*

Fase fenológica		Descripción
1	Emergencia	Emergen los cotiledones del suelo
2	Cotiledonar	Los cotiledones se despliegan de manera horizontal sobre el suelo y aparecen los primeros folíolos en el centro
3	Desarrollo	Aparecen las hojas verdaderas y el periodo dura hasta prefloración
4	Floración	Apertura de las flores que pueden ser de color lila, rosado o amarillo según la variedad de semilla
5	Reproductivo	Dura desde el inicio de la floración hasta la etapa de madurez completa de la vaina
6	Envainamiento	Nacimiento de las vainas
7	Cosecha	Maduración, se deja que el cultivo se seque y se decolore para proceder a la cosecha

Fuente: (Dirección Regional de Agricultura Cajamarca, 2017)

**Figura 7.** Fases fenológicas del chocho

Fuente: (Modificado de Lescanno, 1994)

El cultivo de chocho es considerado como una planta relativamente tolerante a enfermedades como antracnosis, mancha anular y roya que tienen como síntomas el marchitamiento, amarillamiento y muerte de la planta. Además, si no se tiene un control de plagas puede verse atacada por el choclocuro, el trozador, el gusano de vaina y las chinches. Estas plagas pueden dañar completamente el cultivo, o en el caso que se desarrollará la planta sin tener el cuidado adecuado se obtendrán semillas de mala calidad (Caicedo & Peralta, 2001).

Una de las principales enfermedades que ataca a el cultivo de chocho es la antracnosis, causada por el patógeno *Colletotrichum acutatum*. Esta afectación puede presentarse en vainas, semillas, hojas y tallos, en cualquiera de las fases fenológicas, siendo las más susceptibles la fase de crecimiento y de floración. La enfermedad se puede identificar con ciertas características como: manchas de 1 a 3 cm presentes en las vainas, presencia de necrosis en el tallo, causando que la planta se marchite y finalmente en las hojas se pueden observar manchas cloróticas, como muestra la **Figura 8** (Caicedo & Peralta, 2001; Falconí, Visser, & van Heusden, 2013)



Figura 8. Vainas y tallo de chocho con antracnosis

Fuente: (Falconí, Visser, & van Heusden, 2013)

La propagación de enfermedades en el chocho se puede dar a través de las semillas y a través de las plantas que nacen de semillas afectadas. Presentan síntomas en las hojas iniciales y tallos, por tal razón es importante buscar tratamientos que ayuden a combatir enfermedades que afecten el desarrollo de la planta en cada fase fenológica, controlando los patógenos responsables de la reducción y/o pérdida de la producción de un cultivo (Falconí C. , 2012; Falconí, Visser, & van Heusden, 2013).

Existen varios tipos de tratamientos de desinfección de semilla, como el calor seco, uso de químicos (Vitavax) y la radiación solar, siendo este último según Godoy y Luna (2019) el mejor tratamiento para obtener un cultivo de mejor calidad.

La energía proveniente del sol es denominada radiación solar y esta incide sobre una superficie plana a través de ondas electromagnéticas (Felicísimo & Cepedal, 1984). La radiación solar en las últimas décadas ha sido utilizada como un esterilizador químico de semillas convirtiéndose en una alternativa ecológica para combatir el crecimiento de microorganismos fúngicos nocivos para las plantas. Las semillas deben estar expuestas por periodos suficientes para elevar la temperatura de 40° - 60°C, por esto una estufa casera diseñada por César Falconí aprovecha esta energía térmica para aumentar la temperatura a través de superficies reflectantes (Brow et al., 2001; Terán, 2016; Falconí & Yáñez- Mendizábal, 2018).

El método de control biológico consiste en la regularización o supresión del potencial reproductor de organismos a través de la inclusión de enemigos naturales, para controlar los organismos que causan daños en los cultivos. Dentro de los estudios de control biológico se está desarrollando el uso de bacterias, como el *Bacillus* spp., que son microorganismos que favorecen el control de patógenos, es decir inhiben el crecimiento de otros microorganismos perjudiciales

para las plantas. Esta bacteria se encuentra en el suelo y tiene características de resistencia a condiciones extremas debido a la formación de endosporas. Tiene forma bacilar por lo que se lo observa en forma individual, pares o cadenas de bacilos y en esporulación se ven en forma oval.

Por los estudios que se ha realizado con *Bacillus* spp., y las características de sus metabolitos ha aumentado su comercialización y es utilizado en la agricultura como un control biológico de patógenos; se generan productos biodegradables a partir de sus antibióticos para controlar de manera efectiva las enfermedades (Ongena, Henry, & Thonart, 2009; Grijalva, 2015; Falconí & Yáñez- Mendizábal, 2018).

2.8 Diseño experimental y análisis bioestadístico

El diseño experimental es el conjunto de pasos que se estipulan de antemano para obtener datos apropiados de un estudio, donde se deben plantear las variables que pueden influir, los resultados que se quieren alcanzar y la forma en que se analizarán los datos. En los diseños experimentales agrícolas se debe establecer el lote experimental, la unidad muestral, los tratamientos y el número de bloques o repeticiones (Condo & Pazmiño, 2015).

El lote experimental es el área de terreno total con la que se va a trabajar. Por otro lado, la unidad muestral es la parcela dentro de esta área donde se va a aplicar un tratamiento y se caracterizan por presentar diferencias aun cuando se hayan sometido al mismo tratamiento (Condo & Pazmiño, 2015). Los tratamientos son las condiciones que se aplican en una unidad muestral y deben ser medidos y comparados, se requiere de una muestra testigo que no es más que una parcela sin aplicar ningún tipo de condición. Un bloque o repetición es el conjunto de unidades experimentales que recibe el mismo tratamiento y manejo (Di Rienzo et al., 2005).

Existen varios tipos de diseños experimentales como el diseño completamente al azar, cuadrado latino, bloques completamente al azar entre otros. El diseño de bloques completamente al azar (DBCA) es utilizado cuando se tienen varios tratamientos, consiste en tener bloques o repeticiones que contengan los mismos tratamientos distribuidos de manera aleatoria, por lo que el terreno debe presentar homogeneidad ya que esto permite obtener datos apropiados y realizar un análisis estadístico adecuado (Condo & Pazmiño, 2015).

En el campo de la investigación cuando se presentan datos cuantitativos de un diseño experimental, se puede sacar provecho u obtener más información a partir de un análisis de la varianza. Esta técnica permite descomponer la variabilidad total de los resultados de un experimento de acuerdo con las distintas fuentes de variación, de manera que se determina el nivel de significancia y se plantean hipótesis de investigación que se pueden aceptar o rechazar (Di Rienzo et al., 2005).

El análisis estadístico utilizado en un DBCA es el ADEVA, ya que la variabilidad total se desdobra de acuerdo con los tratamientos de cada bloque o repetición y al medio edafoclimático donde se desarrolle el experimento. El análisis de varianza se establece de acuerdo a las siguientes teorías básicas que verifican las pruebas de significancia: a) Los efectos de los tratamientos y ambientes son aditivos. b) El error experimental constituye un elemento al azar estándar e independientemente distribuido con media cero y varianza común (Condo & Pazmiño, 2015).

En un experimento cuando se utiliza el DBCA, se quiere obtener información del efecto del tratamiento, el bloque o repetición en el que se encuentra y el efecto de todas las variables que se han propuesto para realizar el estudio, por lo tanto, este tipo de diseño experimental tiene un modelo estadístico (Gutiérrez & de la Vara, 2012).

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij}; \begin{cases} i = 1, 2, 3, \dots, k \\ j = 1, 2, 3, \dots, b \end{cases} \quad (5)$$

Donde Y_{ij} es la medición que corresponde al tratamiento i y al bloque j , μ es la media global poblacional, τ_i es el efecto debido al tratamiento i , γ_j es el efecto debido al bloque j y ε_{ij} es el error aleatorio atribuible a la medición Y_{ij} (Gutiérrez & de la Vara, 2012).

Todos los diseños comparativos presentan hipótesis a probar, que tratan de la comparación de la media de los tratamientos y bloques (Gutiérrez & de la Vara, 2012)..

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k = \mu \quad (6)$$

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j$$

Para probar esta hipótesis se debe aplicar un análisis de la varianza con dos factores de variación, entonces para un DBCA, el ADEVA se compone de la suma de cuadrados, grados de libertad, cuadrados medios, F_o y el valor de p (Condo & Pazmiño, 2015).

Antes de las ecuaciones es necesario tener clara la notación de puntos, donde $Y_{i\bullet}$ es la suma de las observaciones del tratamiento, $\bar{Y}_{i\bullet}$ la media de las observaciones del i -ésimo tratamiento, $Y_{\bullet j}$ la suma de las observaciones del bloque. $\bar{Y}_{\bullet j}$ la media de las observaciones del j -ésimo bloque, $Y_{\bullet\bullet}$ la suma total de las $N = n_1 + n_2 + \dots + n_k$ mediciones y finalmente $\bar{Y}_{\bullet\bullet}$ la media de todas las observaciones (Gutiérrez & de la Vara, 2012). De acuerdo con varios autores como Gutiérrez & de la Vara (2012), Condo & Pazmiño (2015) y Di Rienzo et al. (2005) las ecuaciones para completar la tabla ADEVA de un DBCA están determinadas en las siguientes tablas (ver **Tabla 3**, **Tabla 4**, **Tabla 5** y **Tabla 6**).

Tabla 3*Ecuaciones de la suma de cuadrados para la ADEVA*

Suma de cuadrados	Ecuación
Total	$SC_T = \sum_{j=1}^b \sum_{i=k}^k Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (7)$
Tratamiento	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_{i.}^2}{b} - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (8)$
Bloque o repetición	$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j}^2}{k} - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (9)$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{TRAT} - SC_B \quad (10)$

Tabla 4*Ecuaciones del cuadrado medio para la ADEVA*

Cuadrado medio	Ecuación
Total	$CM_T = \frac{SC_T}{N - 1} \quad (11)$
Tratamiento	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k^* - 1} \quad (12)$
Bloque o repetición	$CM_B = \frac{SC_B}{b^{**} - 1} \quad (13)$
Error	$CM_E = \frac{SC_E}{(k - 1)(b - 1)} \quad (14)$

*Número total de tratamientos

**Número total de bloques

Tabla 5*Ecuaciones del factor de corrección*

F_0	Ecuación
Tratamiento	$F_0 = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E} \quad (15)$

Continúa



$$\text{Bloque o repetición} \quad F_0 = \frac{CM_B}{CM_E} \quad (16)$$

Tabla 6
Componentes de la tabla ADEVA para un DBCA

Fuentes de Variación (FV)	Grados de Libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	Factor de corrección (F ₀)	ρ-valor
Tratamientos	$k - 1$	SC_{TRAT}	CM_{TRAT}	F_0	$p(F > F_0)$
Bloque	$b - 1$	SC_B	CM_B	F_0	$p(F > F_0)$
Error	$(k - 1)(b - 1)$	SC_E	CM_E		
Total	$N - 1$	SC_T	CM_T		

Fuente: (Di Rienzo et al., 2005; Gutierréz & de la Vara,2012; Condo & Pazmiño,2015)

Cuando se realiza el análisis de la varianza y se obtienen todos los datos, al comparar el valor de Fisher teórico con el calculado y este último resulta ser mayor se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula dando lugar a comparar las medias de cada tratamiento y comprobar si existe diferencias a través de la prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia de 5%, valor que según Contreras & López (2009) puede aumentar a 10% o 15% en el caso de que los factores no controlables hayan sido mayores por ejemplo lluvias abundantes.

$$LSD = t_{\alpha/2, (k-1)(b-1)} \sqrt{\frac{2CM_E}{b}} \quad (17)$$

2.9 Biomasa

Según la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, citado en García & Martínez (2014) la biomasa es la cantidad de materia viva de origen vegetal o animal presente en un momento dado y en un área determinada. Esta puede ser utilizada en el tratamiento de suelos,

por la cantidad de carbono que posee, por lo tanto, la biomasa vegetal es de gran importancia, es el eslabón primario de la cadena trófica y es uno de los atributos más relevantes para caracterizar el estado de un ecosistema. La materia orgánica o biomasa generada por leguminosas tiene un beneficio adicional como mejoradoras del suelo desde el punto de vista de la fertilidad, ya que tienen la propiedad de fijar el nitrógeno atmosférico en los nódulos radiculares (Martínez & Leyva, 2014).

Para estimar la cantidad de biomas de un cultivo, existen métodos tradicionales que se realizan en campo, pero son destructivos y costosos, una alternativa que se presenta es a través de sensores remotos aerotransportados en UAVs (Gil-Docampo et al., 2019).

Con las imágenes del área de estudio obtenidas a través de un UAV se genera un Modelo Digital de superficie (MDS) y un Modelo Digital del Terreno (MDT) y con el cálculo del factor de densidad de un área determinada se estima la biomasa. El MDS es la representación de todas las elevaciones presentes en la superficie, terrenos, infraestructura y vegetación, es decir es una imagen puntual de todas las variaciones de elevación de los objetos y superficies presentes en el momento de la toma de los datos; el MDT representa los valores elevación de los puntos más bajos del terreno (Fuentes, 2012; Gil-Docampo et al., 2019).

Para estimar la biomasa se requiere tener un factor de densidad que permita transformar los valores de volumen en m^3/ha a unidades de kg/ha (Gil-Docampo et al., 2019).

$$Fd = \frac{m}{V} \quad (18)$$

Donde: Fd es el factor de densidad (kg/m^3), m es la masa por unidad experimental (kg) y V es el volumen por unidad experimental (m^3)

Con el factor de densidad y el volumen total de la parcela se puede calcular la biomasa por tratamiento, expresado en unidades (kg/m^2).

$$B = Fd * V \quad (19)$$

CAPITULO III

METODOLOGÍA

El proyecto de investigación se desarrolló en dos zonas con ensayos controlados, el ensayo 1 en una zona con mayor humedad (IASA) y el ensayo 2 en una zona seca (Calderón) (ver apartado 1.5). En ambas zonas se cultivaron dos genotipos diferentes de chocho I-451 Guaranguito y F3 (ECU-2658 x ECU-8415). Se aplicaron dos métodos de control biológico, el primero fue desinfección de semilla a 45 minutos de exposición en una estufa casera (diseñado por César Falconí) en días soleados y en la fase de floración, y envainamiento inoculación de *Bacillus* spp. con una dosis de 1×10^8 UFC/ml.

Para el levantamiento de la información en campo se emplearon herramientas geoespaciales. La captura de datos espectrales se desarrolló con la ayuda de un espectroradiómetro Spectral Evolution PSR-1100 y la toma de imágenes con la cámara Survey3W RGNIR montada en el UAV DJI Mavic PRO.

Posterior a la toma de datos, se analizó la información obtenida y a partir de esta se generaron los índices de vegetación y se llevó a cabo un análisis bioestadístico comparativo para determinar las variaciones de la planta de acuerdo con el genotipo y a los métodos de control biológicos aplicados en cada zona de estudio.

A partir de las imágenes RGNIR obtenidas se estimó la biomasa del cultivo para evaluar su rendimiento en el ciclo de crecimiento bajo las mismas condiciones antes mencionadas y realizar un análisis estadístico entre zonas. La metodología de manera general se puede observar en la **Figura 9**.

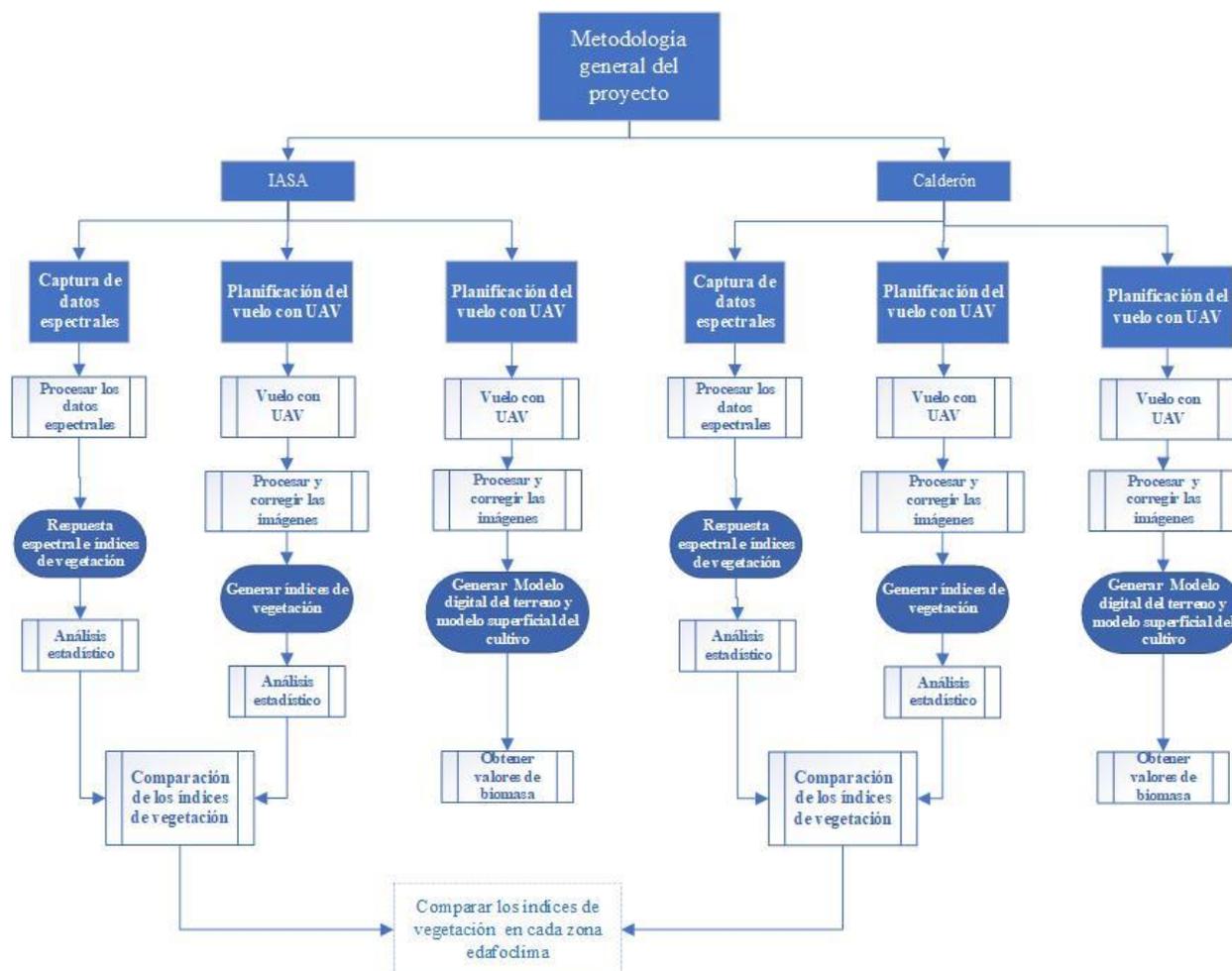


Figura 9. Diagrama general de la metodología aplicada en el proyecto

3.1 Materiales y equipos

Los equipos utilizados en la investigación se detallan a continuación:

- Para la captura de datos radiométricos en campo se utilizó el espectroradiómetro Spectral Evolution PSR-1100 que trabaja en el rango espectral de 320 a 1100 nm.
- La toma de imágenes multispectrales se realizó con la cámara Survey 3W marca MAPIR montada en el UAV DJI Mavic PRO, con el apoyo de la aplicación móvil Pix4Dcapture.

- Para el posicionamiento de los puntos de control se utilizó el GPS de precisión Trimble R4 y R8.
- El procesamiento de la información se ejecutó en los softwares Pix4D Mapper Pro, QGIS 3.10, ArcGIS 10.7 e InfoStat.
- Para la estimación de biomasa se utilizó una estufa, una balanza analítica y un recipiente de aluminio.

3.2 Diseño experimental

La investigación se basó en un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), con un total de seis tratamientos y tres repeticiones para cada una de las zonas de estudio en unidades experimentales. En cada repetición los seis tratamientos están distribuidos de forma aleatoria (ver **Figura 10**).

Se analizaron dos genotipos de chocho, I-451 Guaranguito y F3 (ECU-2658 x ECU-8415) a los que se les aplicaron dos métodos de control biológico: desinfección de semilla e inoculación de *Bacillus* spp.

Para la desinfección de semilla por radiación solar se utilizó una estufa casera (diseñada por César Falconí) con un tiempo de exposición de 45 minutos en días soleados.

La inoculación de *Bacillus* spp. 1×10^8 UFC/ml se aplicó de manera foliar en el inicio y final de la fase de floración.

Por lo tanto, se tienen tres variables a ser tomadas en consideración: el genotipo, el tratamiento de desinfección de semilla y la dosis de *Bacillus* spp. en las dos zonas (ver **Tabla 7**). Estas variables al combinarlas generan un total de seis tratamientos descritos en la **Tabla 8**.

Tabla 7
Variables de investigación

Variables		
Genotipo	G ₁ = F3 (ECU-2658 x ECU-8415)	G ₂ = I-451 Guaranguito
Desinfección de semillas	D ₀ = sin desinfección	D ₁ = con desinfección*
Inoculación de <i>Bacillus</i> spp.	I ₀ = sin inoculación	I ₁ = con inoculación**

* Desinfección de la semilla a 45 minutos por exposición al sol

** Inoculación de *Bacillus* spp. en la etapa de floración y envainamiento.

Tabla 8
Tratamientos aplicados

Tratamiento	Combinación	Descripción
T ₁	G ₂ D ₁ I ₀	Desinfección de semilla + I-451 Guaranguito
T ₂	G ₂ D ₀ I ₁	Inoculación de <i>Bacillus</i> spp. + I-451 Guaranguito
T ₃	G ₂ D ₀ I ₀	Testigo I-451 Guaranguito
T ₄	G ₁ D ₁ I ₀	Desinfección de semilla + F3 (ECU-2658 x ECU-8415)
T ₅	G ₁ D ₀ I ₁	Inoculación de <i>Bacillus</i> spp. + F3 (ECU-2658 x ECU-8415)
T ₆	G ₁ D ₀ I ₀	Testigo F3 (ECU-2658 x ECU-8415)

Los tratamientos se distribuyeron al azar en 18 unidades experimentales de 2.5 m ancho y 2.5 m largo, con un área de 6.25 m² cada una (ver **Figura 10**).

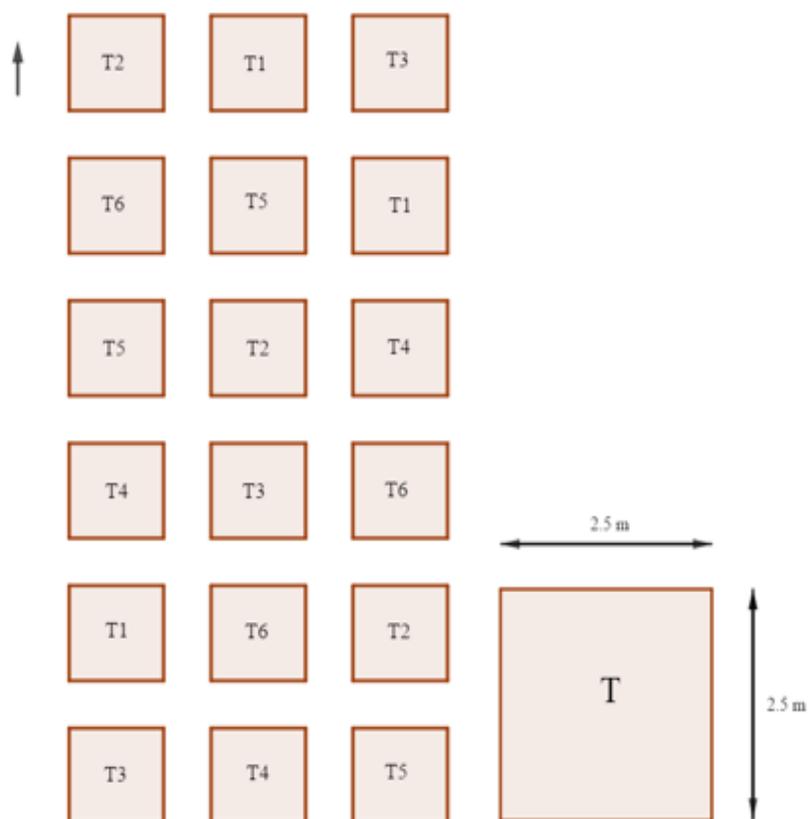


Figura 10. Distribución de los tratamientos en las unidades experimentales

3.3 Tamaño de la muestra y posicionamiento de las plantas para los muestreos

Para seleccionar el tamaño de la muestra se tomó como referencia el número promedio de plantas por tratamiento que en este caso fue de 100 plantas, de este número se escogió 10 plantas al azar (Falconí C. , 2012) de donde se obtuvo la información para obtener índices de vegetación mediante firmas espectrales e imágenes. Para identificar con que plantas se iba a trabajar, se posicionó cada una de las plantas usadas en el muestreo a través del método RTK y con ayuda del GPS Trimble R8. Se georreferenció un total de 180 plantas por cada zona de estudio.

Se obtuvo un archivo en formato *.xls* con la coordenada de cada planta, el número de planta y la repetición para cada zona (ver *Figura 11*, *Figura 12*, *Figura 13* y *Figura 14*).

	A	B	C	D	E
1	Tratamiento	Planta	Repetición	E	N
2	T2	1	1	787794,762	9957535,531
3	T2	2	1	787795,397	9957535,769
4	T2	3	1	787795,688	9957535,875
5	T2	4	1	787794,392	9957536,192
6	T2	5	1	787794,709	9957536,377
7	T2	6	1	787795,559	9957536,510
8	T2	7	1	787794,074	9957537,145
9	T2	8	1	787794,392	9957537,303
10	T2	9	1	787794,101	9957538,124
11	T2	10	1	787795,000	9957538,441
12	T6	1	1	787797,434	9957536,377
13	T6	2	1	787798,017	9957536,483
14	T6	3	1	787798,546	9957536,721
15	T6	4	1	787798,096	9957537,224

Figura 11. Archivo en formato *.xls* de las coordenadas de cada planta de la zona 1

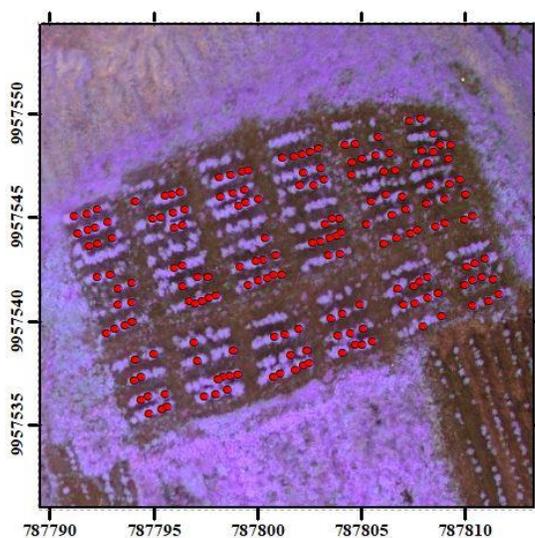


Figura 12. Plantas georreferenciadas en la zona 1

	A	B	C	D	E
1	Tratamiento	Planta	Repetición	E	N
2	T2	1	1	785876,807	9989485,157
3	T2	2	1	785876,129	9989484,522
4	T2	3	1	785876,483	9989483,548
5	T2	4	1	785876,984	9989483,961
6	T2	5	1	785877,206	9989484,197
7	T2	6	1	785877,943	9989483,873
8	T2	7	1	785878,224	9989484,153
9	T2	8	1	785876,955	9989482,855
10	T2	9	1	785877,884	9989482,884
11	T2	10	1	785878,076	9989483,120
12	T6	1	1	785873,532	9989481,689
13	T6	2	1	785873,753	9989481,881
14	T6	3	1	785874,151	9989482,338
15	T6	4	1	785874,904	9989481,822

Figura 13. Archivo en formato .xls de las coordenadas de cada planta de la zona 2

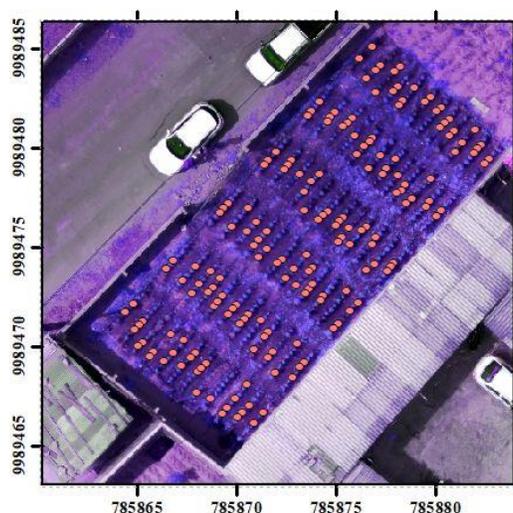


Figura 14. Plantas georreferenciadas en la zona 2

3.5 Datos radiométricos

3.5.1 Captura de datos radiométricos

Para la captura de datos radiométricos se utilizó el espectralradiómetro Spectral Evolution PSR-1100 (ver *Figura 15*), debido a que se quiere correlacionar los datos obtenidos con los dos sensores, el tamaño del pixel generado con el espectralradiómetro debe ser similar al pixel generado

con la cámara multiespectral, por lo tanto, los datos se tomaron con un FOV de 25° a una altura promedio de 3 cm sobre la hoja. El tamaño de la muestra fue de 10 plantas por tratamiento y de cada una de estas se tomaron datos de 5 hojas, con un total de 900 firmas espectrales por zona en cada muestreo (ver *Figura 16*).



Figura 15. Espectroradiómetro



Figura 16. Toma de datos radiométricos

Al ser las fases de floración y envainamiento susceptibles a la antracnosis, se decidió realizar tres tomas de datos en estas etapas. El primer muestreo se realizó a los 87 días de la siembra (inicio de floración), el segundo muestreo a los 100 y 101 días de la siembra (final de floración) y

el último muestreo a los 114 días de la siembra (envainamiento) en la zona 1 y 2 respectivamente (ver **Tabla 9**).

Tabla 9

Cronograma para la captura de datos

Muestreo	Fase fenológica	Zona 1		Zona 2	
		Fecha	Dds*	Fecha	Dds*
Fecha de siembra		28 de agosto de 2019		27 de agosto de 2019	
Muestreo N°1	Floración	22/11/2019	87	23/11/2019	87
Muestreo N°2	Reproductivo	05/12/2019	100	07/12/2019	101
Muestreo N°3	Envainamiento	19/12/2019	114	20/12/2019	114

*Dds: días después de la siembra

3.5.2 Procesamiento de datos

Las firmas espectrales se obtuvieron en formato *.sed*, y fueron descargadas a través del software Windows Mobile. Los datos descargados se exportaron a formato *.xls* para su depuración y análisis. Los archivos constaban de la longitud de onda y su respectiva reflectancia, con un total de 50 firmas espectrales por tratamiento (ver *Figura 17*).

	A	B	C	D
27		Reflectancia		
28	Longitud	T1-1	T1-2	T1-3
29	312	0	0	0
30	313	7.8814	6.4861	8.2770
31	314	7.6708	6.3485	8.1601
32	315	7.2709	6.0663	7.7622
33	316	7.1626	5.8731	7.6164
34	317	7.0270	5.7765	7.5027
35	318	6.81119	5.72212	7.34905
36	319	6.66068	5.51722	7.1245
37	320	6.50942	5.4342	7.04836
38	321	6.37313	5.36598	6.99343

Figura 17. Archivo en formato *.xls* de los valores de reflectancia

3.5.3 Generación de índices de vegetación

Con los promedios resultantes por cada tratamiento se generaron los índices de vegetación NDVI, TNDVI, SR-RE y NDRE a partir del valor de la reflectancia en una determinada longitud de onda especificadas en la **Tabla 10**. Según Godoy y Luna (2019) los índices SR-RE y NDRE, presentan una mayor precisión en la caracterización espectral que otros índices para el cultivo de chocho.

Tabla 10

Fórmulas para el cálculo de los índices de vegetación a partir de firmas espectrales

Índice de vegetación	Fórmula	Referencia
NDVI	$NDVI = \frac{R_{850} - R_{660}}{R_{850} + R_{660}}$	(Apan, Held, Phinn, & Markley, 2003)
TNDVI	$TNDVI = \sqrt{\frac{R_{850} - R_{660}}{R_{850} + R_{660}} + \frac{1}{2}}$	(Apan, Held, Phinn, & Markley, 2003)
SR-RE	$SR - RE = \frac{R_{850}}{R_{700}}$	(Gitelson & Merzlyak, 1994)
NDRE	$NDRE = \frac{R_{790} - R_{720}}{R_{790} + R_{720}}$	(Fitzgerald et al, 2006)

3.5.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos radiométricos se realizó en el software InfoStat, basado en el método de análisis de varianza (ADEVA), donde se planteó una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis alternativa (H_a) al 95% de confianza.

La hipótesis nula se acepta si el estadístico ρ – *valor* es mayor a 0.05, mientras que para aceptar la hipótesis alternativa este ρ – *valor* debe ser menor o igual a 0.05.

$$\begin{cases} H_0 = \rho > 0.05 \\ H_a = \rho \leq 0.05 \end{cases}$$

Si con una significancia del 5% se acepta la hipótesis alternativa, se procede a realizar la prueba LSD Fisher para encontrar diferencias significativas entre los métodos de control biológicos, genotipos, estados fenológicos y zonas edafoclimáticas. Para este proyecto se plantean las siguientes hipótesis de acuerdo con los factores establecidos:

3.5.4.1 Hipótesis de los índices de vegetación basados en los métodos de control biológico

Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico.

Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico.

3.5.4.2 Hipótesis de los índices de vegetación basados en genotipos

Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a las variedades de genotipos.

Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a las variedades de genotipos.

3.5.4.3 Hipótesis de los índices de vegetación basados en estados fenológicos

Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a estados fenológicos.

Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a estados fenológicos.

3.5.4.4 Hipótesis de los índices de vegetación basados en zonas edafoclimáticas

Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas.

Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas.

3.6 Imágenes multiespectrales

3.6.1 Plan de vuelo para el UAV

El vuelo se realizó con el UAV DJI Mavic PRO, donde se montó la cámara multiespectral Survey 3W que cuenta con bandas RGN (Red + Green + NIR), los parámetros a considerar son la altura de vuelo, el traslape transversal y longitudinal, la velocidad y el área de estudio (ver **Tabla 11**). Estos parámetros fueron escogidos debido al nivel de detalle que requiere el cultivo.

Tabla 11

Parámetros de vuelo en Calderón y en el IASA I.

Variable	Unidad
Altura de vuelo	30m
Área de estudio	400 m ²
Velocidad	3 m/s
Traslape transversal	90 %
Traslape longitudinal	90 %

La planificación para la toma de imágenes multiespectrales con UAV corresponde a las etapas de floración y envainamiento. El primer vuelo se realizó a los 76 y 78 días de la siembra (inicio de floración), el segundo muestreo a los 98 días de la siembra (final de floración) y el último

muestreo a los 114 días de la siembra (envainamiento) en la zona 1 y 2 respectivamente (ver **Tabla 12**).

Tabla 12

Cronograma para la captura de imágenes multiespectrales

Captura de imágenes	Fase fenológica	Zona 1		Zona 2	
		Fecha	Dds*	Fecha	Dds*
Fecha de siembra		28 de agosto de 2019		27 de agosto de 2019	
Toma N°1	Floración	12/11/2019	76	14/11/2019	78
Toma N°2	Reproductivo	04/12/2019	98	05/12/2019	98
Toma N°3	Envainamiento	18/12/2019	113	20/12/2019	114

3.6.2 Captura de imágenes multiespectrales

En la captura de imágenes se utilizó las aplicaciones móviles Pix4Dcapture (ver **Figura 18**), donde se colocaron los parámetros de vuelo especificados en la **Tabla 11**, obteniendo un aproximado de 150 imágenes por vuelo, con un GSD de 1cm/píxel.



Figura 18. Área y parámetros de vuelo en la aplicación Pix4D

3.6.3 Puntos de apoyo fotogramétrico

Los puntos de control para la zona 1 (ver *Figura 20*) y 2 (ver *Figura 21*) fueron tomados con el GPS Trimble R4 y R8 doble frecuencia (ver *Figura 19*), con un tiempo de rastreo de 2h 30 min y mediante el método PPP (Posicionamiento Preciso de Puntos) de la aplicación en línea del Sistema de Referencia Espacial Canadiense se obtuvieron las coordenadas con una precisión horizontal promedio de ± 0.005 y una precisión vertical promedio de ± 0.059 (ver **Tabla 13** y **Tabla 14**).



Figura 19. Posicionamiento de los puntos de control

Tabla 13

Coordenadas de los puntos de control de la zona 1

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altura elipsoidal (m)	Precisión horizontal (m)	Precisión vertical (m)
Punto 1	787788.734	9957502.494	2739.252	± 0.004	± 0.060
Punto 2	787810.831	9957552.096	2739.001	± 0.008	± 0.091
Punto 3	787776.358	9957540.561	2738.029	± 0.003	± 0.056

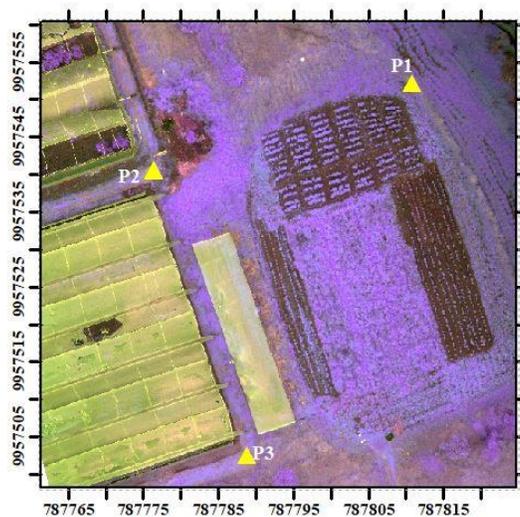


Figura 20. Puntos de control de la zona 1

Tabla 14

Coordenadas de los puntos de control de la zona 2

Punto	Este (m)	Norte (m)	Altura elipsoidal (m)	Precisión horizontal (m)	Precisión vertical (m)
Punto 1	785879.610	9989484.674	2706.789	±0.006	±0.015
Punto 2	785871.012	9989468.724	2706.510	±0.004	±0.063
Punto 3	785868.449	9989479.020	2706.537	±0.004	±0.067

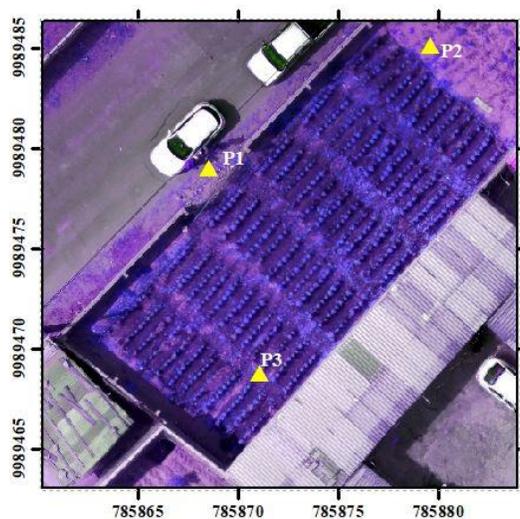


Figura 21. Puntos de control de la zona 2

3.6.4 Procesamiento de las imágenes

Las imágenes multiespectrales fueron procesadas en el software Pix4Dmapper Pro, que permite generar ortomosaicos y MDS a partir de la nube de puntos que se forma con el amarre de las imágenes. El proceso fotogramétrico general se detalla en la **Figura 22**.

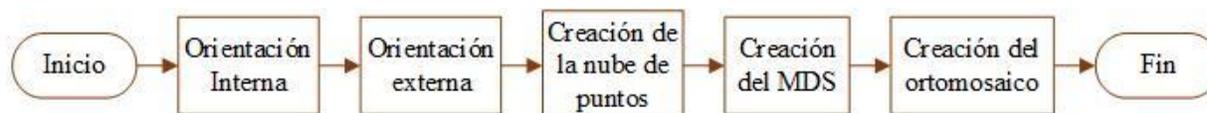


Figura 22. Proceso fotogramétrico

3.6.5 Generación de los índices de vegetación

La calibración de reflectancia de los ortomosaicos (ver **Figura 23**) se realizó en el software MAPIR Camera Control mediante el target de calibración MAPIR Calibration Ground Target Package v 2.0. Para generar los índices de vegetación se utilizó la herramienta *Raster Calculator* del software QGIS 3.10. Debido a la falta de la banda red edge se generaron los índices GNDVI, SRG y SR, que utilizan la banda verde (ver **Tabla 15**).

Tabla 15

Fórmulas para el cálculo de los índices de vegetación a partir de imágenes RGNIR

Índice de vegetación	Fórmula	Referencia
NDVI	$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$	(Rouse, Haas, Schell, & Deering, 1974)
TNDVI	$TNDVI = \sqrt{\frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} + \frac{1}{2}}$	(Rouse, Haas, Schell, & Deering, 1974)
GNDVI	$GNDVI = \frac{R_{NIR} - R_{GREEN}}{R_{NIR} + R_{GREEN}}$	(Gitelson & Merzlyak, 1996)
SRG	$SRG = \frac{R_{NIR}}{R_{GREEN}}$	(Jordan, 1969)
SR	$SR = \frac{R_{NIR}}{R_{RED}}$	(Jordan, 1969)



Figura 23. Ortomosaico calibrado con el software MAPIR

Los índices de vegetación obtenidos a partir de firmas espectrales e imágenes multiespectrales se compararon para determinar en cual sensor existe diferencias entre tratamientos, genotipos, estados fenológicos y zonas.

3.6.6 Análisis estadístico

Continuando con el método de análisis de varianza (ADEVA), se plantearon las siguientes hipótesis para los índices de vegetación generados con imágenes multiespectrales.

3.6.6.1 Hipótesis de los índices de vegetación basados en los métodos de control biológico

Ho: Los índices de vegetación generados mediante imágenes multiespectrales no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico.

Ha: Los índices de vegetación generados mediante imágenes multiespectrales presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico.

3.6.6.2 Hipótesis de los índices de vegetación basados en estados fenológicos

Ho: Los índices de vegetación generados mediante imágenes multiespectrales no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a estados fenológicos.

Ha: Los índices de vegetación generados mediante imágenes multiespectrales presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a estados fenológicos.

3.6.6.3 Hipótesis de los índices de vegetación basados en las zonas edafoclimáticas

Ho: Los índices de vegetación generados mediante imágenes multiespectrales no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas.

Ha: Los índices de vegetación generados mediante imágenes multiespectrales presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas.

3.7 Biomasa

3.7.1 Generación del MDT y MDS

Para la estimación de biomasa en el caso de leguminosas se necesitaron dos tomas, el primer vuelo se realizó a los 8 días de la siembra (modelo digital del terreno) y el segundo a los 114 días de siembra (modelo digital de superficie).

Al igual que las imágenes que se utilizaron en el cálculo de índices de vegetación a partir de la cámara multiespectral, se realizó un plan de vuelo en el que se utilizaron los mismos parámetros de vuelo del apartado 3.6.1 (ver **Tabla 11**). Con las imágenes ya tomadas, se procedió al trabajo en gabinete, en este, se procedió a realizar una revisión visual para seguidamente procesarlas en el software Pix4D Mapper, obteniendo así el MDT y MDS de acuerdo con el proceso fotogramétrico mostrado en de la **Figura 22**.

Una vez que se obtuvieron los modelos, estos fueron procesados para minimizar los errores de cota. Se pincharon un total de 30 puntos en calles y zonas sin vegetación cercanas al cultivo en el MDT y MDS como sugiere Gil-Docampo et al. (2019). De estos puntos tomados se saca la diferencia en Z y posterior a esto se calcula la media, este factor se le suma a la altura de los puntos de control que se utilizó en el MDS original. Ya corregida la cota es recomendable editar los modelos de tal forma que quede únicamente el área de estudio.

3.7.2 Volumen de la unidad experimental y área total

Con el MDT y MDS ya corregidos, se calculó el volumen de cada unidad experimental, con la coordenada GPS de la planta que se tomó de muestra en cada parcela. El resultado está dado en m^3 y la suma de todos los volúmenes da el volumen total de los cultivos de todo el área de estudio.

3.7.3 Estimación de biomasa de las plantas por Tratamiento

Para la estimación de biomasa se requiere un factor de densidad, por lo que se utilizó un aro del diámetro aproximado de la planta (ver **Figura 24**), se lo dejó caer sobre la planta seleccionada al azar, así se tuvo una base y una altura para formar un cilindro alrededor de la planta y se obtuvo el volumen que ocupa esa planta dentro de la unidad experimental. Otro de los parámetros que se requiere es la masa de la planta dentro del cilindro, entonces

se cortó la misma para ser pesada en húmedo y en seco obteniendo valores con unidades de masa (ver *Figura 25*).



Figura 24. Aro aproximado del diámetro de la planta

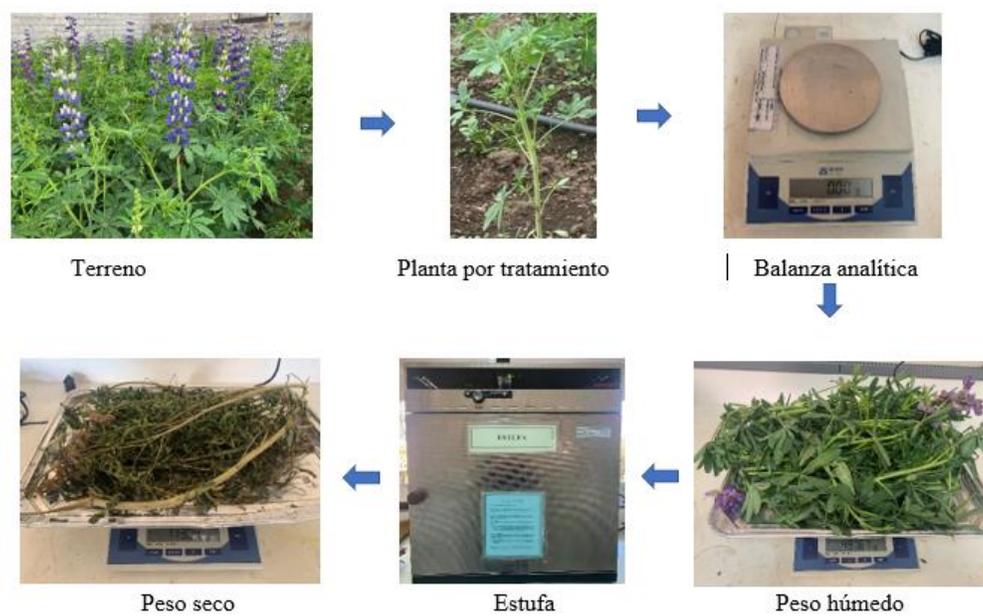


Figura 25. Proceso para estimar el peso húmedo y peso seco de una planta

Con los datos obtenidos se aplicó la fórmula del factor de densidad (18) (ver apartado 2.9), se transformaron los volúmenes de cada unidad experimental en valores de biomasa y al sacar el promedio de estos factores por repeticiones se tuvo un registro general del factor de densidad por tratamiento para cada zona de estudio.

Con el factor de densidad y el volumen total de la parcela se puede calcular la biomasa por tratamiento, expresado en unidades (kg). Si se divide por la superficie de cada parcela se puede expresar la biomasa por unidad de superficie (kg/m^2).

3.7.4 Análisis estadístico

Continuando con el método de análisis de varianza (ADEVA), se plantearon las siguientes hipótesis para la estimación de biomasa a partir de modelo digitales.

3.7.4.1 Hipótesis para la estimación de biomasa basada en las zonas edafoclimáticas

Ho: La estimación de biomasa no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas.

Ha: La estimación de biomasa presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los índices de vegetación que se generaron a partir de firmas espectrales e imágenes multiespectrales se analizaron estadísticamente a través del método de análisis de varianza ADEVA y la prueba LSD Fisher, de acuerdo con las variables de estudio, tratamientos, genotipos y estados fenológicos del cultivo.

4.1 Análisis bioestadístico a partir de firmas espectrales

Los índices de vegetación que se generaron a partir de datos radiométricos fueron NDVI, TNDVI, SRRE y NDRE, con el valor de reflectancia descrito en el apartado 3.5.3.

4.1.1 Zona 1

4.1.1.1 Análisis de la varianza por genotipos

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.5.4.2 se muestran en las **Tabla 16**, **Tabla 17** y **Tabla 18**.

Tabla 16

ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.002	1	0.0015	11.31	0.004
Genotipo	0.002	1	0.0015	11.31	0.004
Error	0.002	16	0.0001		
Total	0.004	17			
TNDVI					
Bloque	0.0003	1	0.00028	11.29	0.004
Genotipo	0.0003	1	0.00028	11.29	0.004
Error	0.0004	16	0.00003		
Total	0.0007	17			

Continúa



SRRE					
Bloque	0.57	1	0.57	14.45	0.002
Genotipo	0.57	1	0.57	14.45	0.002
Error	0.63	16	0.04		
Total	1.2	17			
NDRE					
Bloque	0.001	1	0.00097	25.66	0.0001
Genotipo	0.001	1	0.00097	25.66	0.0001
Error	0.001	16	0.00004		
Total	0.002	17			

Tabla 17*ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo*

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.01	1	0.0056	14.02	0.002
Genotipo	0.01	1	0.0056	14.02	0.002
Error	0.01	16	0.0004		
Total	0.01	17			
TNDVI					
Bloque	0.001	1	0.001	13.98	0.002
Genotipo	0.001	1	0.001	13.98	0.002
Error	0.001	16	0.0001		
Total	0.002	17			
SRRE					
Bloque	19.26	1	19.26	5.21	0.04
Genotipo	19.26	1	19.26	5.21	0.04
Error	59.1	16	3.69		
Total	78.36	17			
NDRE					
Bloque	0.01	1	0.014	9.03	0.01
Genotipo	0.01	1	0.014	9.03	0.01
Error	0.03	16	0.002		
Total	0.04	17			

Tabla 18*ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo*

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.004	1	0.004	5.49	0.03
Genotipo	0.004	1	0.004	5.49	0.03
Error	0.012	16	0.001		
Total	0.016	17			
TNDVI					
Bloque	0.001	1	0.0007	5.55	0.03
Genotipo	0.001	1	0.0007	5.55	0.03
Error	0.002	16	0.0001		
Total	0.003	17			
SRRE					
Bloque	108.16	1	108.16	18.29	0.001
Genotipo	108.16	1	108.16	18.29	0.001
Error	94.63	16	5.91		
Total	202.79	17			
NDRE					
Bloque	0.02	1	0.02	4.77	0.04
Genotipo	0.02	1	0.02	4.77	0.04
Error	0.06	16	0		
Total	0.08	17			

Al tener como resultado un p -valor <0.05 en cada uno de los muestreos se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a las variedades de genotipos*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a las variedades de genotipos*”. Al determinar que existe diferencia estadística entre los tratamientos se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.1.1.2 Prueba de Fisher por genotipos

Al comparar las medias obtenidas de las tres repeticiones se observa que existen diferencias estadísticas entre los dos genotipos de chocho, F3 (ECU-2658 x ECU-8415) y el genotipo I-451 Guaranguito para todos los índices de vegetación. Al observar la **Tabla 19**, **Tabla 20**, **Tabla 21**, y **Tabla 22** se observa que G1 presenta mejores resultados que el G2 en todos los muestreos.

Tabla 19

Prueba LSD Fisher del NDVI para el genotipo

Genotipo	Medias	Rango
Primer muestreo		
G2	0.83	A
G1	0.85	B
Segundo muestreo		
G2	0.91	A
G1	0.94	B
Tercer muestreo		
G2	0.92	A
G1	0.95	B

Tabla 20

Prueba LSD Fisher del TNDVI para el genotipo

Genotipo	Medias	Rango
Primer muestreo		
G2	1.15	A
G1	1.16	B
Segundo muestreo		
G2	1.19	A
G1	1.2	B
Tercer muestreo		
G2	1.19	A
G1	1.2	B

Tabla 21*Prueba LSD Fisher del SRRE para el genotipo*

Genotipo	Medias	Rango
Primer muestreo		
G2	5.18	A
G1	5.53	B
Segundo muestreo		
G2	9.46	A
G1	11.53	B
Tercer muestreo		
G2	7.86	A
G1	12.76	B

Tabla 22*Prueba LSD Fisher del NDRE para el genotipo*

Genotipo	Medias	Rango
Primer muestreo		
G2	0.34	A
G1	0.35	B
Segundo muestreo		
G2	0.47	A
G1	0.52	B
Tercer muestreo		
G2	0.45	A
G1	0.52	B

Para mejorar el rendimiento y producción del chocho se han analizado los diferentes genotipos de acuerdo con su rendimiento y la tolerancia que presenta frente a las enfermedades. El INIAP en el Programa Nacional de Leguminosas y Granos Andinos (PRONALEG), ha buscado mejorar la genética de estos granos, dando origen a variedades de chocho con mejor calidad, con ciclos vegetativos precoces y más resistentes a factores de variación (Peralta, Rivera, Murillo, & Monar, 2010).

Al analizar los genotipos G1, F3 (ECU-2658 x ECU-8415) y G2 I-451 Guaranguito, a través de índices de vegetación, el G1 presenta mejores características, ciclo de crecimiento más corto y mayor resistencia a enfermedades, contrario con las evidencias presentadas por Guaytarilla & Falconí (2014), quienes determinaron en su investigación que el G2, I-451 Guaranguito fue significativamente precoz al alcanzar un porcentaje de plantas florecidas, mayor número de plantas resistentes a la antracnosis, presentar plantas vigorosas y con un gran número de vainas por rama todo esto con valores superiores al G1, F3 (ECU-2658 x ECU-8415).

4.1.1.3 Análisis de la varianza por tratamientos

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.5.4.1 se muestran en las **Tabla 23**, **Tabla 24** y **Tabla 25**.

Tabla 23

ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.0022	5	0.0004	3.6	0.03
Tratamiento	0.0022	5	0.0004	3.6	0.03
Error	0.0015	12	0.0001		
Total	0.0037	17			
TNDVI					
Bloque	0.0004	5	0.00008	3.59	0.03
Tratamiento	0.0004	5	0.00008	3.59	0.03
Error	0.0003	12	0.00002		
Total	0.0007	17			
SRRE					
Bloque	0.84	5	0.17	5.73	0.01
Tratamiento	0.84	5	0.17	5.73	0.01
Error	0.35	12	0.03		
Total	1.2	17			
NDRE					
Bloque	0.0012	5	0.00024	7.44	0.002

Continúa



Tratamiento	0.0012	5	0.00024	7.44	0.002
Error	0.0004	12	0.00003		
Total	0.0016	17			

Tabla 24*ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo*

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.01	5	0.0014	3.26	0.04
Tratamiento	0.01	5	0.0014	3.26	0.04
Error	0.01	12	0.0004		
Total	0.01	17			
TNDVI					
Bloque	0.001	5	0.0002	3.26	0.04
Tratamiento	0.001	5	0.0002	3.26	0.04
Error	0.001	12	0.0001		
Total	0.002	17			
SRRE					
Bloque	32.57	5	6.51	1.71	0.21
Tratamiento	32.57	5	6.51	1.71	0.21
Error	45.79	12	3.82		
Total	78.36	17			
NDRE					
Bloque	0.02	5	0.004	2.06	0.14
Tratamiento	0.02	5	0.004	2.06	0.14
Error	0.02	12	0.002		
Total	0.04	17			

Tabla 25*ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo*

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.01	5	0.0022	5.04	0.01
Tratamiento	0.01	5	0.0022	5.04	0.01
Error	0.01	12	0.0004		
Total	0.02	17			

Continúa



TNDVI					
Bloque	0.002	5	0.0004	5.09	0.01
Tratamiento	0.002	5	0.0004	5.09	0.01
Error	0.001	12	0.0001		
Total	0.003	17			
SRRE					
Bloque	137.1	5	27.42	5.01	0.01
Tratamiento	137.1	5	27.42	5.01	0.01
Error	65.69	12	5.47		
Total	202.79	17			
NDRE					
Bloque	0.05	5	0.01	4.47	0.02
Tratamiento	0.05	5	0.01	4.47	0.02
Error	0.03	12	0.002		
Total	0.08	17			

Al tener como resultado un ρ -valor <0.05 en cada uno de los muestreos se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico*”. Al determinar que existe diferencia estadística entre los tratamientos se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.1.1.4 Prueba de Fisher por tratamientos

4.1.1.4.1 NDVI y TNDVI

Al ser el NDVI y TNDVI índices que se correlacionan, el comportamiento con respecto al rango es similar. Al realizar una comparación de las medias obtenidas de las tres repeticiones se observa que existen diferencias estadísticas entre ciertos tratamientos. En la **Tabla 26** y **Tabla 27**

para el primer muestreo se observa que el T3 y T1 (A) son estadísticamente iguales y difieren del T6 (C) mientras que el T4, T2 y T5 presenta características que se pueden asociar a los otros tratamientos, por tal razón se lo discrimina para el análisis final. Para el segundo muestreo se observa que el T2 (A) difiere del T4, T5 y T6 (B). El T1 y T3 tienen un comportamiento similar y se los discrimina para el análisis final. En el tercer muestreo se observa que el T3 (A) difiere del T5, T1 y T4 (C), y que el T2 y T6 tienen un comportamiento similar, por lo que no se toman en consideración para el análisis final. Para todos los casos resulta que el T4, T6 y T5 son los mejores tratamientos y en el último muestreo sobresale el T1.

Tabla 26
Prueba LSD Fisher del NDVI para los tratamientos

Tratamiento	Medias	Rango
Primer muestreo		
T3	0.82	A
T1	0.83	A
T2	0.83	A B
T4	0.84	A B C
T5	0.85	B C
T6	0.85	C
Segundo muestreo		
T2	0.89	A
T3	0.91	A B
T1	0.91	A B
T6	0.93	B
T5	0.95	B
T4	0.95	B
Tercer muestreo		
T3	0.89	A
T2	0.9	A B
T6	0.94	B C
T5	0.95	C
T1	0.95	C
T4	0.95	C

Tabla 27
Prueba LSD Fisher del TNDVI para los tratamientos

Tratamiento	Medias	Rango
Primer muestreo		
T3	1.15	A
T1	1.15	A
T2	1.15	A B
T4	1.16	A B C
T5	1.16	B C
T6	1.16	C
Segundo muestreo		
T2	1.18	A
T3	1.19	A B
T1	1.19	A B
T6	1.2	B
T5	1.2	B
T4	1.2	B
Tercer muestreo		
T3	1.18	A
T2	1.19	A B
T6	1.2	B C
T5	1.2	C
T1	1.21	C
T4	1.21	C

4.1.1.4.2 SRRE

Como se observa en la **Tabla 23** del apartado 4.1.1.3 solo existe diferencias estadísticas significativas para el primer y tercer muestreo, por esto se realiza la comparación de las medias obtenidas solo para estos casos. Se observa en la **Tabla 28** que, para el primer muestreo existe diferencias entre el T1, T2 (A) y T6 (C) siendo el tratamiento T6 el mejor para este caso. En el tercer muestreo el T1, T2, T3 (A) difieren del T5 y T4 (B). Para este índice los mejores tratamientos se generan con el genotipo G1.

Tabla 28*Prueba LSD Fisher del SRRE para los tratamientos*

Tratamiento	Medias	Rango
Primer muestreo		
T2	5.11	A
T1	5.17	A
T3	5.25	A B
T4	5.32	A B
T5	5.55	B C
T6	5.73	C
Tercer muestreo		
T3	6.74	A
T2	7.76	A
T1	9.08	A
T6	10.62	A B
T5	13.81	B
T4	13.86	B

4.1.1.4.3 NDRE

Como se observa en la **Tabla 23** del apartado 4.1.1.3 solo existe diferencias estadísticas significativas para el primer y tercer muestreo, por esto se realiza la comparación de las medias obtenidas solo para estos casos. Se observa en la **Tabla 29** que, para el primer muestreo existe diferencias entre el T2 (A), T5 y T6 (C). En el tercer muestreo el T2 y T3 (A) difieren del T1, T5 y T4 (B). De los dos muestreos el tratamiento que resalta significativamente es el T5.

Tabla 29*Prueba LSD Fisher del NDRE para los tratamientos*

Tratamiento	Medias	Rango
Primer muestreo		
T2	0.33	A
T1	0.34	A B
T3	0.34	A B
T4	0.35	B C
T6	0.35	C

Continúa



T5	0.36	C
Tercer muestreo		
T3	0.41	A
T2	0.42	A
T6	0.48	A B
T5	0.53	B
T1	0.53	B
T4	0.54	B

La baja productividad del chocho es causada principalmente por el patógeno *Colletotrichum acutatum* que proviene de semillas infectadas. Los estudios realizados por Yáñez-Mendizábal y Falconí (2018) y Godoy y Luna (2019) afirma que la desinfección de semilla por radiación solar y el uso de cepas de *Bacillus* reduce el efecto de enfermedades fúngicas y son alternativas al uso de fungicidas químicos (Yáñez–Mendizábal, Falconí, & Grijalba, 2015).

De acuerdo con los resultados obtenidos para los índices de vegetación en los tres muestreos, los mejores tratamientos fueron la desinfección de semilla y la inoculación de *Bacillus*, corroborando la información anterior.

Al tener el F3 (ECU-2658 x ECU-8415) una mejor adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales, el testigo de este genotipo resulto mejor que los demás tratamientos en determinados casos (Yáñez-Mendizábal & Falconí, 2018).

4.1.1.5 Análisis de la varianza por estados fenológicos

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.5.4.3 se muestran en las **Tabla 30**.

Tabla 30
ADEVA de los índices de vegetación

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.1	2	0.049	79.43	0.0001
Estado fenológico	0.1	2	0.049	79.43	0.0001
Error	0.03	51	0.001		
Total	0.13	53			
TNDVI					
Bloque	0.02	2	0.0089	81.27	0.0001
Estado fenológico	0.02	2	0.0089	81.27	0.0001
Error	0.01	51	0.0001		
Total	0.02	53			
SRRE					
Bloque	306.1	2	153.05	27.65	0.0001
Estado fenológico	306.1	2	153.05	27.65	0.0001
Error	282.34	51	5.54		
Total	588.44	53			
NDRE					
Bloque	0.25	2	0.13	53.65	0.0001
Estado fenológico	0.25	2	0.13	53.65	0.0001
Error	0.12	51	0		
Total	0.37	53			

Al tener como resultado un p -valor <0.05 en cada uno de los muestreos se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a estados fenológicos*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo a estados fenológicos*”. Al

determinar que existe diferencia estadística entre los tratamientos se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.1.1.6 Prueba de Fisher por estados fenológicos

El comportamiento NDVI, TNDVI, SRRE Y NDRE con respecto al estado fenológico presentan rangos iguales, entonces al realizar una comparación de las medias se observa que existen diferencias estadísticas entre estados. En la **Tabla 31** se observa que el estado 3 (desarrollo) difiere del estado 4 (floración) y 5 (reproductivo) que presentan el mismo comportamiento.

Tabla 31
Prueba LSD Fisher del NDVI para los estados fenológicos

Estado fenológico	Medias	Rango
NDVI		
3	0.84	A
4	0.92	B
5	0.93	B
TNDVI		
3	1.16	A
4	1.19	B
5	1.2	B
SRRE		
3	5.36	A
5	10.31	B
4	10.5	B
NDRE		
3	0.35	A
5	0.48	B
4	0.5	B

Los índices de vegetación generados a partir de datos radiométricos permiten una caracterización de estados fenológicos para el cultivo de chocho. El estudio realizado por Godoy y

Luna (2019) para un ensayo en campo presenta una mayor precisión espectral en los índices SRRE y NDRE en sus diferentes estados fenológicos, lo que difiere a los resultados obtenidos, ya que los cuatro índices presentaron la misma precisión espectral para los tres estados.

4.1.2 Zona 2

4.1.2.1 Análisis de la varianza por genotipos

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.5.4.2 se muestran en las **Tabla 32**, **Tabla 33** y **Tabla 34**.

Tabla 32

ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.01	1	0.01	12.08	0.0031
Genotipo	0.01	1	0.01	12.08	0.0031
Error	0.01	16	0.0001		
Total	0.02	17			
TNDVI					
Bloque	0.001	1	0.0012	12.12	0.0031
Genotipo	0.001	1	0.0012	12.12	0.0031
Error	0.002	16	0.0001		
Total	0.003	17			
SRRE					
Bloque	20.32	1	20.32	7.25	0.016
Genotipo	20.32	1	20.32	7.25	0.016
Error	44.84	16	2.8		
Total	65.15	17			
NDRE					
Bloque	0.01	1	0.0097	6.48	0.02
Genotipo	0.01	1	0.0097	6.48	0.02
Error	0.02	16	0.0015		
Total	0.03	17			

Tabla 33*ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo*

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.01	1	0.0075	12.01	0.0032
Genotipo	0.01	1	0.0075	12.01	0.0032
Error	0.01	16	0.0006		
Total	0.02	17			
TNDVI					
Bloque	0.001	1	0.0013	11.93	0.003
Genotipo	0.001	1	0.0013	11.93	0.003
Error	0.002	16	0.0001		
Total	0.003	17			
SRRE					
Bloque	9.72	1	9.72	1.97	0.18
Genotipo	9.72	1	9.72	1.97	0.18
Error	79.09	16	4.94		
Total	88.81	17			
NDRE					
Bloque	0.001	1	0.0007	0.31	0.58
Genotipo	0.001	1	0.0007	0.31	0.58
Error	0.03	16	0.0021		
Total	0.03	17			

Tabla 34*ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo*

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.004	1	0.0036	8.56	0.01
Genotipo	0.004	1	0.0036	8.56	0.01
Error	0.01	16	0.0004		
Total	0.01	17			
TNDVI					
Bloque	0.001	1	0.0006	8.55	0.01
Genotipo	0.001	1	0.0006	8.55	0.01
Error	0.001	16	0.0001		

Continúa 

Total	0.002	17			
SRRE					
Bloque	61.58	1	61.58	3.37	0.09
Genotipo	61.58	1	61.58	3.37	0.09
Error	292.62	16	18.29		
Total	354.2	17			
NDRE					
Bloque	0.005	1	0.0045	1.56	0.23
Genotipo	0.005	1	0.0045	1.56	0.23
Error	0.05	16	0.0029		
Total	0.05	17			

Al tener como resultado un ρ -valor <0.05 en cada uno de los muestreos se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a las variedades de genotipo*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo a las variedades de genotipo*”. Al determinar que existe diferencia estadística entre los tratamientos se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.1.2.2 Prueba de Fisher por genotipos

Al comparar las medias obtenidas de las tres repeticiones se observa que existen diferencias estadísticas entre los dos genotipos de chocho, F3 (ECU-2658 x ECU-8415) y el genotipo I-451 Guaranguito para todos los índices de vegetación plantados en este estudio. Al observar la **Tabla 35**, **Tabla 36** y **Tabla 37** se observa que G1 presenta mejores resultados que el G2 en todos los muestreos.

Tabla 35*Prueba LSD Fisher del NDVI para el genotipo*

Genotipo	Medias	Rango
Primer muestreo		
G2	0.87	A
G1	0.91	B
Segundo muestreo		
G2	0.9	A
G1	0.94	B
Tercer muestreo		
G2	0.93	A
G1	0.96	B

Tabla 36*Prueba LSD Fisher del TNDVI para el genotipo*

Genotipo	Medias	Rango
Primer muestreo		
G2	1.17	A
G1	1.19	B
Segundo muestreo		
G2	1.18	A
G1	1.20	B
Tercer muestreo		
G2	1.19	A
G1	1.21	B

Tabla 37*Prueba LSD Fisher del SRRE y NDRE para el genotipo*

Genotipo	Medias	Rango
SRRE		
Primer muestreo		
G2	7.28	A
G1	9.41	B
NDRE		
Primer muestreo		
G2	7.28	A
G1	9.41	B

Para mejorar el rendimiento y producción del chocho se ha analizado los diferentes genotipos de acuerdo con su rendimiento y la tolerancia que presenta frente a las enfermedades. El

INIAP en el Programa Nacional de Leguminosas y Granos Andinos (PRONALEG), ha buscado mejorar la genética de estos granos, dando origen a variedades de chocho con mejor calidad, con ciclos vegetativos precoces y más resistentes a factores de variación (Peralta, Rivera, Murillo, & Monar, 2010) .

Al analizar los genotipos G1, F3 (ECU-2658 x ECU-8415) y G2 I-451 Guaranguito, a través de índices de vegetación ,el G1 presenta mejores características, ciclo de crecimiento más corto y mayor resistencia a enfermedades, contrario con las evidencias presentadas por Guaytarilla & Falconí,(2014), quienes determinaron en su investigación que el G2, I-451 Guaranguito fue significativamente precoz al alcanzar un porcentaje de plantas florecidas, mayor número de plantas resistentes a la antracnosis, presentar plantas vigorosas y con un gran número de vainas por rama todo esto con valores superiores al G1, F3 (ECU-2658 x ECU-8415).

4.1.2.3 Análisis de la varianza por tratamientos

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.5.4.1 se muestran en las **Tabla 38**, **Tabla 39** y **Tabla 40**.

Tabla 38

ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.01	5	0.002	4.52	0.0151
Tratamiento	0.01	5	0.0021	4.52	0.0151
Error	0.01	12	0.0005		
Total	0.02	17			
TNDVI					
Bloque	0.002	5	0.0004	4.52	0.02
Tratamiento	0.002	5	0.0004	4.52	0.02
Error	0.001	12	0.0001		

Continúa



Total	0.003	17			
SRRE					
Bloque	37.38	5	7.48	3.23	0.04
Tratamiento	37.38	5	7.48	3.23	0.04
Error	27.77	12	2.31		
Total	65.15	17			
NDRE					
Bloque	0.02	5	0.00395	3.39	0.04
Tratamiento	0.02	5	0.00395	3.39	0.04
Error	0.01	12	0.00117		
Total	0.03	17			

Tabla 39

ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.01	5	0.0024	5.02	0.01
Tratamiento	0.01	5	0.0024	5.02	0.01
Error	0.01	12	0.0005		
Total	0.02	17			
TNDVI					
Bloque	0.002	5	0.0004	4.98	0.01
Tratamiento	0.002	5	0.0004	4.98	0.01
Error	0.001	12	0.0001		
Total	0.003	17			
SRRE					
Bloque	32.82	5	6.56	1.41	0.29
Tratamiento	32.82	5	6.56	1.41	0.29
Error	55.99	12	4.67		
Total	88.81	17			
NDRE					
Bloque	0.01	5	0	1.58	0.24
Tratamiento	0.01	5	0	1.58	0.24
Error	0.02	12	0		
Total	0.03	17			

Tabla 40*ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo*

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.01	5	0.00119	3.29	0.04
Tratamiento	0.01	5	0.00119	3.29	0.04
Error	0.0001	12	0.00036		
Total	0.01	17			
TNDVI					
Bloque	0.001	5	0.0002	3.28	0.04
Tratamiento	0.001	5	0.0002	3.28	0.04
Error	0.001	12	0.0001		
Total	0.002	17			
SRRE					
Bloque	136.84	5	27.37	1.51	0.26
Tratamiento	136.84	5	27.37	1.51	0.26
Error	217.36	12	18.11		
Total	354.2	17			
NDRE					
Bloque	0.02	5	0.0032	1.12	0.4
Tratamiento	0.02	5	0.0032	1.12	0.4
Error	0.03	12	0.0029		
Total	0.05	17			

Al tener como resultado un ρ -valor <0.05 en cada uno de los muestreos se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico*”. Al determinar que existe diferencia estadística entre los tratamientos se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.1.2.4 Prueba de Fisher por tratamientos

4.1.2.3.1 NDVI y TNDVI

Al ser el NDVI y TNDVI índices que se correlacionan, el comportamiento con respecto al rango es similar. Al realizar una comparación de las medias obtenidas de las tres repeticiones se observa que existen diferencias estadísticas entre ciertos tratamientos. En la **Tabla 41** y **Tabla 42** para el primer muestreo se observa que el T3, T2 y T1 (A) son estadísticamente iguales y difieren del T5 y T6 (B) mientras que el T4 presenta características que se pueden asociar a los otros tratamientos, por tal razón se lo discrimina para el análisis final. Par el segundo muestreo se observa que parejas de tratamientos son estadísticamente iguales, T3 y T2 (A), T5 y T6 (B). El T1 y T4 tienen un comportamiento similar, y se los discrimina para el análisis final. En el tercer muestreo se observa que el T3 (A) y T5 (C) difieren entre sí y que el T1, T2, T4 y T6 tienen un comportamiento similar no se toman en consideración para el análisis final. Para todos los casos resulta ser que el T6 y T5 son los mejores tratamientos.

Tabla 41
Prueba LSD Fisher del NDVI para los tratamientos

Tratamiento	Medias	Rango	
Primer muestreo			
T3	0.86	A	
T2	0.87	A	
T1	0.88	A	
T4	0.88	A	B
T5	0.92	B	
T6	0.92	B	
Segundo muestreo			
T3	0.88	A	
T2	0.89	A	
T4	0.91	A	B
T1	0.91	A	B
T5	0.95	B	
T6	0.95	B	

Continúa



Tercer muestreo				
T3	0.91	A		
T2	0.93	A	B	
T1	0.94	A	B	C
T4	0.94	A	B	C
T6	0.95		B	C
T5	0.97			C

Tabla 42

Prueba LSD Fisher del TNDVI para los tratamientos

Tratamiento	Medias	Rango		
Primer muestreo				
T3	1.17	A		
T2	1.17	A		
T1	1.18	A		
T4	1.18	A	B	
T5	1.19			B
T6	1.19			B
Segundo muestreo				
T3	1.17	A		
T2	1.18	A		
T4	1.19	A	B	
T1	1.19	A	B	
T5	1.20			B
T6	1.20			B
Tercer muestreo				
T3	1.19	A		
T2	1.20	A	B	
T1	1.20	A	B	C
T4	1.20	A	B	C
T6	1.21		B	C
T5	1.21			C

La baja productividad del chocho es causada principalmente por el patógeno *Colletotrichum acutatum* que proviene de semillas infectadas. Los estudios realizados por Yáñez-Mendizábal y Falconí (2018) y Godoy y Luna (2019) afirma que la desinfección de semilla por radiación solar y el uso de cepas de *Bacillus* reduce el efecto de enfermedades fúngicas y son alternativas al uso de fungicidas químicos (Yáñez–Mendizábal, Falconí, & Grijalba, 2015).

De acuerdo con los resultados obtenidos para los índices de vegetación en los tres muestreos, los mejores tratamientos fueron la desinfección de semilla y la inoculación de *Bacillus*, corroborando la información anterior. Al tener el F3 (ECU-2658 x ECU-8415) una mejor adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales, el testigo de este genotipo resulto mejor que los demás tratamientos en determinados casos (Yáñez-Mendizábal & Falconí, 2018).

4.1.2.3.2 SRRE

Como se observa en la **Tabla 38**, **Tabla 39** y **Tabla 40** del apartado 4.1.2.2 solo existe diferencias estadísticas significativas para el primer muestreo, por esto se realiza la comparación de las medias obtenidas solo para ese caso. Se observa en la **Tabla 43** que existe diferencias entre el T3 (A) y T5 (C) siendo el tratamiento T5 el mejor en este muestreo. Al presentar el T1, T2, T4 y T6 un comportamiento similar no se toman en consideración para el análisis final.

Tabla 43

Prueba LSD Fisher del SRRE para los tratamientos

Tratamiento	Medias	Rango		
T3	6.71	A		
T2	7	A		
T4	7.71	A	B	
T1	8.14	A	B	C
T6	9.95	B		C
T5	10.57	C		

4.1.2.3.3 NDRE

Como se observa en la **Tabla 38**, **Tabla 39** y **Tabla 40** del apartado 4.1.2.2 solo existe diferencias estadísticas significativas para el primer muestreo, por esto se realiza la comparación de las medias obtenidas solo para ese caso. Se observa en la **Tabla 44** que existe parejas de tratamientos que son estadísticamente iguales, T3 y T2 (A), T5 y T6 (B) siendo los últimos los

mejores tratamientos en el este muestreo. El T1 y T4 tienen un comportamiento similar, y se los discrimina para el análisis final.

Tabla 44

Prueba LSD Fisher del NDRE para los tratamientos

Tratamiento	Medias	Rango	
T3	0.4	A	
T2	0.42	A	
T4	0.44	A	B
T1	0.45	A	B
T6	0.48	B	
T5	0.5	B	

4.1.2.5 Análisis de la varianza por estados fenológicos

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.5.4.3 se muestran en la **Tabla 45**.

Tabla 45

ADEVA de los índices de vegetación

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.02	2	0.0124	14.55	0.00001
Estado fenológico	0.02	2	0.0124	14.55	0.00001
Error	0.04	51	0.0009		
Total	0.07	53			
TNDVI					
Bloque	0.004	2	0.0022	14.54	0.00001
Estado fenológico	0.004	2	0.0022	14.54	0.00001
Error	0.008	51	0.0002		
Total	0.012	53			
SRRE					
Bloque	445.15	2	222.57	22.34	0.00001
Estado fenológico	445.15	2	222.57	22.34	0.00001

Continúa



Error	508.16	51	9.96		
Total	953.31	53			
NDRE					
Bloque	0.11	2	0.06	23.89	0.00001
Estado fenológico	0.11	2	0.06	23.89	0.00001
Error	0.12	51	0.003		
Total	0.23	53			

Al tener como resultado un ρ -valor <0.05 al analizar la varianza por estados fenológicos se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a estados fenológicos*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a estados fenológicos*”. Al determinar que existe diferencia estadística entre los tratamientos se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.1.2.6 Prueba de Fisher por estados fenológicos

El comportamiento NDVI, TNDVI, SRRE Y NDRE con respecto al estado fenológico presentan rangos similares. Al realizar una comparación de las medias obtenidas de los tratamientos se observa que existen diferencias estadísticas entre estados. En la **Tabla 46** para los índices de vegetación NDVI y TNDVI se observa que existe diferencias para los tres estados (fase fenológica: desarrollo, floración y reproductivo), mientras que para el SRRE Y NDRE el estado 3 y 4 presentan el mismo comportamiento (A) y difieren del estado 5 (B).

Tabla 46*Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para estados fenológicos*

Estado Fenológico	Medias	Rango
NDVI		
3	0.89	A
4	0.92	B
5	0.94	C
TNDVI		
3	1.18	A
4	1.19	B
5	1.20	C
SRRE		
3	8.35	A
4	9.15	A
5	14.8	B
NDRE		
3	0.45	A
4	0.46	A
5	0.55	B

Los índices de vegetación generados a partir de datos radiométricos e imágenes multiespectrales permiten una caracterización de estados fenológicos para el cultivo de chocho. El estudio realizado por Godoy y Luna (2019) para un ensayo en campo presenta una mayor precisión espectral en los índices SRRE y NDRE en sus diferentes estados fenológicos, lo que difiere a los resultados obtenidos, ya que los índices que presentan mayor significancia para los diferentes estados fueron el NDVI y TNDVI.

4.1.3 Comparación bioestadística entre zonas

A partir de los índices calculados tanto para la Zona 1 como para la Zona 2 se realizó una comparación donde se determinó en cuál de las dos zonas el cultivo de chocho tiene una mejor adaptación.

4.1.3.1 Análisis de la varianza por zonas

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.5.4.4 se muestran en las **Tabla 47**, **Tabla 48** y **Tabla 49**.

Tabla 47

ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.02	1	0.0245	42.76	0.00001
Zona	0.02	1	0.0245	42.76	0.00001
Error	0.02	34	0.0006		
Total	0.04	35			
TNDVI					
Bloque	0.004	1	0.0045	43.12	0.00001
Zona	0.004	1	0.0045	43.12	0.00001
Error	0.004	34	0.00061		
Total	0.008	35			
SRRE					
Bloque	80.47	1	80.47	41.24	0.00001
Zona	80.47	1	80.47	41.24	0.00001
Error	66.35	34	1.95		
Total	146.82	35			
NDRE					
Bloque	0.09	1	0.09	90.2	0.00001
Zona	0.09	1	0.09	90.2	0.00001
Error	0.04	34	0.001		
Total	0.13	35			

Tabla 48

ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0	1	0.0006	0.7	0.41
Zona	0	1	0.0006	0.7	0.41
Error	0.03	34	0.0009		

Continúa



Total	0.03	35			
TNDVI					
Bloque	0.0001	1	0.0001	0.7	0.41
Zona	0.0001	1	0.0001	0.7	0.41
Error	0.0052	34	0.0002		
Total	0.0053	35			
SRRE					
Bloque	16.25	1	16.25	3.31	0.08
Zona	16.25	1	16.25	3.31	0.08
Error	167.16	34	4.92		
Total	183.41	35			
NDRE					
Bloque	0.01	1	0.009	4.07	0.05
Zona	0.01	1	0.009	4.07	0.05
Error	0.07	34	0.002		
Total	0.08	35			

Tabla 49*ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo*

Fuentes de Variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0	1	0.001	1.27	0.27
Zona	0	1	0.001	1.27	0.27
Error	0.03	34	0.0008		
Total	0.03	35			
TNDVI					
Bloque	0.0002	1	0.0002	1.29	0.26
Zona	0.0002	1	0.0002	1.29	0.26
Error	0.0046	34	0.0001		
Total	0.0046	35			
SRRE					
Bloque	181.18	1	181.18	11.06	0.00001
Zona	181.18	1	181.18	11.06	0.00001
Error	556.99	34	16.38		
Total	738.16	35			
NDRE					
Bloque	0.04	1	0.04	11.01	0.00001
Zona	0.04	1	0.04	11.01	0.00001

Continúa



Error	0.13	34	0
Total	0.17	35	

Al tener para algunos resultados un ρ -valor <0.05 a partir del cálculo de la media de los tratamientos y las repeticiones se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas.*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas*”. Al determinar que existe diferencia estadística entre los tratamientos se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.1.3.2 Prueba de Fisher por zonas

El comportamiento NDVI, TNDVI, SRRE Y NDRE con respecto a las zonas presentan rangos similares. Al realizar una comparación de las medias en las tres repeticiones se observa que existen diferencias estadísticas entre zonas. En la **Tabla 50** se observa que la zona 2 presenta plantas con mayor vigorosidad. En la **Tabla 51** no se presenta el NDVI y el TNDVI al no tener diferencia estadística, sin embargo, con los otros índices, SRRE y NDRE se observa al igual que los casos anteriores que la zona 2 obtuvo mejores resultados.

Tabla 50

Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para el primer muestreo

Zona	Medias	Rango
NDVI		
1	0.84	A
2	0.89	B
TNDVI		
1	1.16	A

Continúa



2	1.93	B
SRRE		
1	5.36	A
2	8.35	B
NDRE		
1	0.35	A
2	0.45	B

Tabla 51

Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para el tercer muestreo

Zona	Medias	Rango
SRRE		
1	10.31	A
2	14.8	B
NDRE		
1	0.48	A
2	0.55	B

Establecer diferencias entre zonas, permite identificar que prácticas o manejo agronómico son adecuados aplicar en cada una de ellas. En el caso de chocho, se dice que es un cultivo que se adapta con facilidad a las condiciones edafoclimáticas, sin embargo, es un cultivo de clima moderado (Caicedo & Peralta, 2000).

Al realizar una comparación entre zonas con los resultados obtenidos se establece que la zona 2 tiene mejores características que favorecen el desarrollo del cultivo, ya que es una zona seca con precipitaciones anuales entre 500 y 600 mm, en Caicedo & Peralta (2001), se puede corroborar que el cultivo de chocho requiere de precipitaciones anuales de 300 a 600 mm, se desarrolla en zonas secas y son susceptibles al exceso de humedad, como es el caso de la zona 1 que presenta precipitaciones anuales de 1300 mm. Por tal razón se recomienda sembrar en zonas secas en el mes de noviembre y en zonas húmedas en el mes de diciembre.

4.2 Análisis bioestadístico a partir de imágenes multiespectrales

Los índices de vegetación que se generaron a partir de imágenes multiespectrales fueron NDVI, TNDVI, GNDVI, SGR y SR. Estos índices utilizan la banda roja, verde y NIR (ver **Tabla 15**), debido a que el sensor utilizado para el estudio no tiene la banda red edge no se generaron los índices que se calcularon a partir de firmas espectrales.

4.2.1 Zona 1

4.2.1.1 Análisis de la varianza por genotipos y tratamientos

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.5.4.1 se muestran en las **Tabla 52**, **Tabla 53** y **Tabla 54**.

Tabla 52

ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.001	5	0.0003	0.2	0.96
Genotipo	0.001	1	0.0006	0.41	0.53
Tratamiento	0.001	4	0.0002	0.15	0.96
Error	0.017	12	0.0015		
Total	0.019	17			
TNDVI					
Bloque	0.0004	5	0.0001	0.2	0.96
Genotipo	0.0002	1	0.0002	0.42	0.53
Tratamiento	0.0002	4	0.0001	0.14	0.96
Error	0.0044	12	0.0004		
Total	0.0048	17			
GNDVI					
Bloque	0.001	5	0.0002	0.29	0.91
Genotipo	0.0006	1	0.0006	0.85	0.37
Tratamiento	0.0004	4	0.0001	0.15	0.96
Error	0.0083	12	0.0007		
Total	0.0093	17			

Continúa



SRG					
Bloque	0.27	5	0.05	0.3	0.91
Genotipo	0.14	1	0.14	0.78	0.39
Tratamiento	0.13	4	0.03	0.17	0.95
Error	2.22	12	0.18		
Total	2.49	17			

SR					
Bloque	0.1	5	0.02	0.23	0.94
Genotipo	0.03	1	0.03	0.39	0.54
Tratamiento	0.07	4	0.02	0.19	0.94
Error	1.07	12	0.09		
Total	1.17	17			

Tabla 53*ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo*

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.0007	5	0.0001	0.31	0.9
Genotipo	0.0001	1	0.0001	0.23	0.64
Tratamiento	0.0006	4	0.0002	0.33	0.85
Error	0.0057	12	0.0005		
Total	0.0065	17			
TNDVI					
Bloque	0.00016	5	0.00003	0.31	0.9
Genotipo	0.00002	1	0.00002	0.23	0.64
Tratamiento	0.00013	4	0.00003	0.33	0.85
Error	0.0012	12	0.0001		
Total	0.00136	17			
GNDVI					
Bloque	0.00015	5	0.00003	0.29	0.91
Genotipo	0.00001	1	0.00001	0.07	0.8
Tratamiento	0.00014	4	0.00003	0.35	0.84
Error	0.00121	12	0.0001		
Total	0.00136	17			
SRG					
Bloque	0.33	5	0.07	0.28	0.91
Genotipo	0.05	1	0.05	0.23	0.64

Continúa

Tratamiento	0.28	4	0.07	0.29	0.88
Error	2.82	12	0.23		
Total	3.15	17			
SR					
Bloque	0.33	5	0.07	0.28	0.91
Genotipo	0.05	1	0.05	0.23	0.64
Tratamiento	0.28	4	0.07	0.29	0.88
Error	2.82	12	0.23		
Total	3.15	17			

Tabla 54

ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.0011	5	0.0002	0.32	0.89
Genotipo	0.0007	1	0.0007	1.01	0.33
Tratamiento	0.0004	4	0.0001	0.15	0.96
Error	0.0086	12	0.0007		
Total	0.0098	17			
TNDVI					
Bloque	0.0003	5	0.00006	0.32	0.89
Genotipo	0.0002	1	0.00018	0.99	0.34
Tratamiento	0.0001	4	0.00003	0.15	0.96
Error	0.0022	12	0.00018		
Total	0.0025	17			
GNDVI					
Bloque	0.0011	5	0.0002	0.68	0.65
Genotipo	0.0003	1	0.0003	1	0.34
Tratamiento	0.0008	4	0.0002	0.6	0.67
Error	0.004	12	0.0003		
Total	0.0051	17			
SRG					
Bloque	0.39	5	0.08	0.71	0.63
Genotipo	0.14	1	0.14	1.26	0.28
Tratamiento	0.25	4	0.06	0.57	0.69
Error	1.33	12	0.11		
Total	1.72	17			

Continúa



SR					
Bloque	0.08	5	0.02	0.33	0.89
Genotipo	0.05	1	0.05	1.08	0.32
Tratamiento	0.03	4	0.01	0.14	0.96
Error	0.57	12	0.05		
Total	0.65	17			

Se observa como resultado un ρ -valor > 0.05 en cada uno de los muestreos, se acepta la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico*” y se rechaza la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico*”.

4.2.1.2 Análisis de la varianza por estados fenológicos

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.5.4.3 se muestra en la **Tabla 55**.

Tabla 55
ADEVA de los índices de vegetación

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.48	2	0.241	349.77	<0.0001
Estado fenológico	0.48	2	0.241	349.77	<0.0001
Error	0.04	51	0.001		
Total	0.52	53			
TNDVI					
Bloque	0.11	2	0.0548	326.26	<0.0001
Estado fenológico	0.11	2	0.0548	326.26	<0.0001
Error	0.01	51	0.0002		

Continúa



Total	0.12	53			
GNDVI					
Bloque	0.58	2	0.2906	939.98	<0.0001
Estado fenológico	0.58	2	0.2906	939.98	<0.0001
Error	0.02	51	0.0003		
Total	0.6	53			
SRG					
Bloque	14.5	2	7.25	50.25	<0.0001
Estado fenológico	14.5	2	7.25	50.25	<0.0001
Error	7.36	51	0.14		
Total	21.86	53			
SR					
Bloque	92.17	2	46.08	472.89	<0.0001
Estado fenológico	92.17	2	46.08	472.89	<0.0001
Error	4.97	51	0.1		
Total	97.14	53			

Al tener como resultado un ρ -valor <0.05 en cada uno de los muestreos se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a estados fenológicos*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a estados fenológicos*”. Al determinar que existe diferencia estadística entre los tratamientos se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.2.1.3 Prueba de Fisher por estados fenológicos

El comportamiento NDVI, TNDVI, GNDVI, SRG y SR con respecto al estado fenológico presentan rangos similares, al realizar una comparación de las medias se observa que existen diferencias estadísticas entre estados. En la **Tabla 56** para los índices de vegetación NDVI,

TNDVI, GNDVI y SRG se observa que existe diferencias para los tres estados (desarrollo, floración y reproductivo), mientras que para el SR el estado 3 y 5 presentan el mismo comportamiento y difieren del estado 4.

Tabla 56

Prueba LSD Fisher del NDVI para los tratamientos

Estado fenológico	Medias	Rango
NDVI		
3	0.5	A
5	0.51	B
4	0.7	C
TNDVI		
3	1	A
5	1.01	B
4	1.1	C
GNDVI		
3	0.64	A
5	0.67	B
4	0.87	C
SRG		
3	4.58	A
5	5.12	B
4	5.84	C
SR		
3	3	A
5	3.14	A
4	5.84	B

4.2.2 Zona 2

4.2.2.1 Análisis de la varianza por genotipos y tratamientos

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.6.6.1 se muestran en las **Tabla 57**, **Tabla 58** y **Tabla 59**.

Tabla 57*ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo*

Fuentes de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.00199	5	0.0004	0.26	0.93
Genotipo	0.00037	1	0.00037	0.24	0.63
Tratamiento	0.00161	4	0.0004	0.26	0.9
Error	0.01849	12	0.00154		
Total	0.02048	17			
TNDVI					
Bloque	0.00053	5	0.00011	0.25	0.93
Genotipo	0.0001	1	0.0001	0.24	0.63
Tratamiento	0.00043	4	0.00011	0.26	0.9
Error	0.00498	12	0.00042		
Total	0.00551	17			
GNDVI					
Bloque	0.0008	5	0.00015	0.18	0.97
Genotipo	0.0002	1	0.00019	0.22	0.65
Tratamiento	0.0006	4	0.00014	0.17	0.95
Error	0.0102	12	0.00085		
Total	0.0109	17			
SRG					
Bloque	0.02019	5	0.00404	0.21	0.95
Genotipo	0.00446	1	0.00446	0.23	0.64
Tratamiento	0.01572	4	0.00393	0.2	0.93
Error	0.23284	12	0.0194		
Total	0.25302	17			
SR					
Bloque	0.08903	5	0.01781	0.29	0.91
Genotipo	0.01471	1	0.01471	0.24	0.63
Tratamiento	0.07432	4	0.01858	0.31	0.87
Error	0.72848	12	0.06071		
Total	0.81751	17			

Tabla 58*ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo*

Fuentes de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.00332	5	0.00066	0.17	0.97
Genotipo	0.00006	1	0.00006	0.01	0.91
Tratamiento	0.00326	4	0.00082	0.21	0.93
Error	0.04658	12	0.00388		
Total	0.0499	17			
TNDVI					
Bloque	0.00091	5	0.00018	0.18	0.96
Genotipo	0.00003	1	0.00003	0.03	0.86
Tratamiento	0.00088	4	0.00022	0.22	0.92
Error	0.01186	12	0.00099		
Total	0.01277	17			
GNDVI					
Bloque	0.00189	5	0.00038	0.16	0.97
Genotipo	0	1	0	0	0.97
Tratamiento	0.00189	4	0.00047	0.2	0.93
Error	0.02827	12	0.00236		
Total	0.03016	17			
SRG					
Bloque	0.04773	5	0.00955	0.12	0.99
Genotipo	0.00166	1	0.00166	0.02	0.89
Tratamiento	0.04607	4	0.01152	0.15	0.96
Error	0.94832	12	0.07903		
Total	0.99605	17			
SR					
Bloque	0.29275	5	0.05855	0.17	0.97
Genotipo	0.01396	1	0.01396	0.04	0.85
Tratamiento	0.27879	4	0.0697	0.2	0.93
Error	4.21381	12	0.35115		
Total	4.50656	17			

Tabla 59*ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo*

Fuentes de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.00061	5	0.00012	0.43	0.82
Genotipo	0.0003	1	0.0003	1.06	0.32
Tratamiento	0.00031	4	0.00008	0.27	0.89
Error	0.0034	12	0.00028		
Total	0.00401	17			
TNDVI					
Bloque	0.00013	5	0.00003	0.42	0.82
Genotipo	0.00006	1	0.00006	1.04	0.33
Tratamiento	0.00007	4	0.00002	0.27	0.89
Error	0.00073	12	0.00006		
Total	0.00085	17			
GNDVI					
Bloque	0.00073	5	0.00015	0.08	0.99
Genotipo	0.00012	1	0.00012	0.06	0.81
Tratamiento	0.00062	4	0.00015	0.08	0.99
Error	0.02239	12	0.00187		
Total	0.02313	17			
SRG					
Bloque	0.027	5	0.0054	0.05	1
Genotipo	0.0023	1	0.0023	0.02	0.88
Tratamiento	0.0247	4	0.00618	0.06	0.99
Error	1.2133	12	0.10111		
Total	1.2404	17			
SR					
Bloque	0.2857	5	0.0571	0.54	0.74
Genotipo	0.147	1	0.147	1.39	0.26
Tratamiento	0.1387	4	0.0347	0.33	0.85
Error	1.2712	12	0.1059		
Total	1.5569	17			

Se observa como resultado un p -valor > 0.05 en cada uno de los muestreos, se acepta la hipótesis nula, “*H₀: Los índices de vegetación generados mediante imágenes multiespectrales no*

presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico” y se rechaza la hipótesis alternativa, “Ha: Los índices de vegetación generados mediante imágenes multiespectrales presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a la aplicación de métodos de control biológico”.

4.2.2.2 Análisis de la varianza por estados fenológicos

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.6.6.2 se muestra en la **Tabla 60**.

Tabla 60

ADEVA de los índices de vegetación para estados fenológicos

Fuentes de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.36	2	0.182	124.78	0.0001
Estado fenológico	0.36	2	0.182	124.78	0.0001
Error	0.07	51	0.001		
Total	0.44	53			
TNDVI					
Bloque	0.06	2	0.0283	75.54	0.0001
Estado fenológico	0.06	2	0.0283	75.54	0.0001
Error	0.02	51	0.0004		
Total	0.08	53			
GNDVI					
Bloque	0.13	2	0.064	50.9	0.0001
Estado fenológico	0.13	2	0.064	50.9	0.0001
Error	0.06	51	0.001		
Total	0.19	53			
SRG					
Bloque	4.47	2	2.24	45.8	0.0001
Estado fenológico	4.47	2	2.24	45.8	0.0001
Error	2.49	51	0.05		
Total	6.96	53			

Continúa



SR					
Bloque	82.98	2	41.49	307.51	0.0001
Estado fenológico	82.98	2	41.49	307.51	0.0001
Error	6.88	51	0.13		
Total	89.86	53			

Al tener como resultado un p -valor <0.05 de acuerdo estado fenológico se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados mediante imágenes multiespectrales no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados estados fenológicos*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados mediante imágenes multiespectrales presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a estados fenológicos*”. Al determinar que existe diferencia estadística entre los tratamientos se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.2.2.3 Prueba de Fisher por estados fenológicos

El comportamiento NDVI, TNDVI, GNDVI, SRG y SR con respecto al estado fenológico presentan rangos similares. Al realizar una comparación de las medias se observa que existen diferencias estadísticas entre estados. En la **Tabla 61** se observa que con todos los índices de vegetación especificados se pueden identificar diferencias en los tres estados (desarrollo, floración y reproductivo).

Tabla 61
Prueba LSD Fisher para estados fenológicos

Estado fenológico	Medias	Rango
NDVI		
3	0.64	A
4	0.77	B

Continúa



5	0.83	C
TNDVI		
3	1.17	A
4	1.23	B
5	1.24	C
GNDVI		
3	0.35	A
4	0.44	B
5	0.47	C
SRG		
3	2.10	A
4	2.60	B
5	2.78	C
SR		
3	3.58	A
4	5.98	B
5	6.39	C

Los índices de vegetación generados a partir de datos radiométricos e imágenes multiespectrales permiten una caracterización de estados fenológicos para el cultivo de chocho. El estudio realizado por Godoy y Luna (2019) para un ensayo en campo presenta una mayor precisión espectral en los índices SRRE y NDRE en sus diferentes estados fenológicos, lo que difiere a los resultados obtenidos, ya que todos los índices presentan el mismo comportamiento para la zona 2.

4.2.3 Comparación bioestadística entre zonas

A partir de los índices calculados tanto para la Zona 1 como para la Zona 2 se realizó una comparación donde se determinó en cuál de las dos zonas el cultivo de chocho tiene una mejor adaptación.

4.2.3.1 Análisis de la varianza por zonas

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.6.6.3 se muestran en las **Tabla 62**, **Tabla 63** y **Tabla 64**.

Tabla 62

ADEVA de los índices de vegetación para el primer muestreo

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.18	1	0.178	153.63	0.0001
Zona	0.18	1	0.178	153.63	0.0001
Error	0.04	34	0.001		
Total	0.22	35			
TNDVI					
Bloque	0.26	1	0.2591	857.41	0.0001
Zona	0.26	1	0.2591	857.41	0.0001
Error	0.01	34	0.0003		
Total	0.27	35			
GNDVI					
Bloque	0.73	1	0.727	1222.47	0.0001
Zona	0.73	1	0.727	1222.47	0.0001
Error	0.02	34	0.001		
Total	0.75	35			
SRG					
Bloque	55.14	1	55.14	682.64	0.0001
Zona	55.14	1	55.14	682.64	0.0001
Error	2.75	34	0.08		
Total	57.88	35			
SR					
Bloque	2.96	1	2.96	50.61	0.0001
Zona	2.96	1	2.96	50.61	0.0001
Error	1.99	34	0.06		
Total	4.95	35			

Tabla 63*ADEVA de los índices de vegetación para el segundo muestreo*

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.04	1	0.041	24.45	0.0001
Zona	0.04	1	0.041	24.45	0.0001
Error	0.06	34	0.002		
Total	0.1	35			
TNDVI					
Bloque	0.17	1	0.169	406.96	0.0001
Zona	0.17	1	0.169	406.96	0.0001
Error	0.01	34	0.0004		
Total	0.18	35			
GNDVI					
Bloque	1.68	1	1.68	1812.44	0.0001
Zona	1.68	1	1.68	1812.44	0.0001
Error	0.03	34	0.001		
Total	1.71	35			
SRG					
Bloque	94.8	1	94.8	778.13	0.0001
Zona	94.8	1	94.8	778.13	0.0001
Error	4.14	34	0.12		
Total	98.94	35			
SR					
Bloque	0.17	1	0.17	0.75	0.39
Zona	0.17	1	0.17	0.75	0.39
Error	7.65	34	0.23		
Total	7.82	35			

Tabla 64*ADEVA de los índices de vegetación para el tercer muestreo*

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
NDVI					
Bloque	0.92	1	0.9162	2258.43	0.0001
Zona	0.92	1	0.9162	2258.43	0.0001
Error	0.01	34	0.0004		

Continúa



Total	0.93	35			
TNDVI					
Bloque	0.479	1	0.4794	4933.44	0.0001
Zona	0.479	1	0.4794	4933.44	0.0001
Error	0.003	34	0.0001		
Total	0.483	35			
GNDVI					
Bloque	0.36	1	0.365	439.03	0.0001
Zona	0.36	1	0.365	439.03	0.0001
Error	0.03	34	0.001		
Total	0.39	35			
SRG					
Bloque	48.94	1	48.94	562.34	0.0001
Zona	48.94	1	48.94	562.34	0.0001
Error	2.96	34	0.09		
Total	51.89	35			
SR					
Bloque	94.74	1	94.74	1457.59	0.0001
Zona	94.74	1	94.74	1457.59	0.0001
Error	2.21	34	0.06		
Total	96.95	35			

Al tener como resultado un ρ -valor <0.05 a partir del cálculo de la media de los tratamientos y las repeticiones se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas.*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ha: Los índices de vegetación generados por datos radiométricos presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas*”. Al determinar que existe diferencia estadística entre los tratamientos se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.2.3.2 Prueba de Fisher por zonas

El comportamiento NDVI, TNDVI, GNDVI, SRG y SR con respecto a las zonas presentan rangos similares. Al realizar una comparación de las medias en las tres repeticiones se observa que existen diferencias estadísticas entre zonas. En la **Tabla 65**, **Tabla 66** y **Tabla 67** se observa que los índices que se calculan a partir de una banda verde son mejores en la zona 1, debido a que las plantas en la zona 1 tenían un pigmento mayor de la zona 2. En la **Tabla 66** el índice SR no presenta diferencia estadística para ninguna de las zonas.

Tabla 65

Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para el primer muestreo

Zona	Medias	Rango
NDVI		
1	0.5	A
2	0.64	B
TNDVI		
1	1	A
2	1.17	B
GNDVI		
2	0.35	A
1	0.64	B
SRG		
2	2.1	A
1	4.58	B
SR		
1	3	A
2	3.58	B

Tabla 66

Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para el segundo muestreo

Zona	Medias	Rango
NDVI		
1	0.7	A
2	0.77	B

Continúa



TNDVI		
1	1.1	A
2	1.23	B
GNDVI		
2	0.44	A
1	0.87	B
SRG		
2	2.6	A
1	5.84	B

Tabla 67

Prueba LSD Fisher de los índices de vegetación para el tercer muestreo

Zona	Medias	Rango
NDVI		
1	0.51	A
2	0.83	B
TNDVI		
1	1.01	A
2	1.24	B
GNDVI		
2	0.47	A
1	0.67	B
SRG		
2	2.78	A
1	5.12	B
SR		
1	3.14	A
2	6.39	B

Establecer diferencias entre zonas, permite identificar que prácticas o manejo agronómico son adecuados aplicar en cada una de ellas. En el caso de chocho, se dice que es un cultivo que se adapta con facilidad a las condiciones edafoclimáticas, sin embargo, es un cultivo de clima moderado (Caicedo & Peralta, 2000).

Al realizar una comparación entre zonas con los resultados obtenidos se establece que la zona 2 tiene mejores características que favorecen el desarrollo del cultivo, ya que es una zona seca en Caicedo & Peralta (2001), se puede corroborar que el cultivo de chocho requiere de precipitaciones anuales de 300 a 600 mm, se desarrolla en zonas secas y son susceptibles al exceso de humedad, como es el caso de la zona 1.

4.3 Biomasa

4.3.1 Cálculo del factor de la densidad

El factor de densidad para las dos zonas se calculó de acuerdo al apartado 3.7.3 para cada uno de los tratamientos (ver **Tabla 68** y **Tabla 69**).

Tabla 68

Masa de la planta por tratamiento para la zona 1

Tratamiento	Masa (kg)	Factor de densidad (kg/m ³)
1	0.219	1.362
2	0.229	1.362
3	0.234	1.362
4	0.233	1.362
5	0.245	1.381
6	0.238	1.343

Tabla 69

Masa de la planta por tratamiento para la zona 2

Tratamiento	Masa (kg)	Factor de densidad (kg/m ³)
1	0.261	1.624
2	0.290	1.803
3	0.231	1.439
4	0.293	1.784
5	0.342	2.171
6	0.274	1.701

4.3.2 Volumen de cada unidad experimental por zona

A partir del MDT y MDS generados, se sacó el volumen para cada unidad experimental (ver **Tabla 70** y **Tabla 71**).

Tabla 70

Volumen por tratamiento de la zona 1

Tratamiento	Volumen (m ³)
T1	6.350
T2	5.656
T3	6.432
T4	5.460
T5	5.475
T6	5.592

Tabla 71

Volumen por tratamiento de la zona 2

Tratamiento	Volumen (m ³)
T1	7.674
T2	8.111
T3	8.802
T4	9.117
T5	7.656
T6	8.932

4.3.3 Estimación de la biomasa por tratamientos para cada zona

A partir de la ecuación (19) en el apartado 2.9 se obtuvo los valores de biomasa total por tratamiento (ver **Tabla 72** y **Tabla 73**).

Tabla 72

Biomasa por tratamiento para la zona 1

Tratamiento	Biomasa (kg)
T1	8.646
T2	7.701
T3	8.758

Continúa



T4	7.434
T5	7.559
T6	7.509

Tabla 73

Biomasa por tratamiento para la zona 2

Tratamiento	Biomasa (kg)
T1	12.462
T2	14.621
T3	12.666
T4	16.263
T5	16.618
T6	15.191

4.3.4 Comparación de la biomasa entre zonas

4.3.4.1 Análisis de la varianza por zonas

Los resultados del análisis de la varianza para aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el apartado 3.7.4.1 se muestran en la **Tabla 74**.

Tabla 74

ADEVA de la biomasa por zonas

Factor variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Bloque	134.76	1	134.76	77.89	<0.0001
Zona	134.76	1	134.76	77.89	<0.0001
Error	17.30	10	1.73		
Total	152.07	11			

Al tener como resultado un p -valor <0.05 a partir del cálculo de la media de los tratamientos se rechaza la hipótesis nula, “*Ho: La estimación de biomasa no presentan diferencias significativas en la caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas*” y se acepta la hipótesis alternativa, “*Ho: La estimación de biomasa presentan diferencias significativas en la*

caracterización del cultivo asociados a distintas zonas edafoclimáticas”. Al determinar que existe diferencia estadística entre las zonas se procede a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza.

4.3.4.2 Prueba de Fisher por zonas

La estimación de la biomasa utilizando sensores remotos permite obtener diferencias en la cantidad total que se genera en cada zona (ver **Tabla 75**).

Tabla 75

Prueba LSD Fisher de la biomasa por zonas

Zona	Medias	Rango
1	7.93	A
2	14.64	B

Al realizar una comparación entre zonas con los resultados obtenidos se establece que la zona 2 genera una mayor cantidad de biomasa debido a la vigorosidad de las plantas. En el caso de chocho, se dice que es un cultivo que se adapta con facilidad a las condiciones edafoclimáticas, sin embargo, es un cultivo de clima moderado seco (Caicedo & Peralta, 2000).

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El uso de tecnologías geoespaciales permite la caracterización del cultivo de chocho aplicando métodos de control biológico en diferentes zonas edafoclimáticas. Para el proyecto se utilizaron dos sensores diferentes, un espectroradiómetro y una cámara multispectral montada en un UAV. Con el espectroradiómetro se determinó que se puede diferenciar el comportamiento espectral del cultivo en las variables establecidas, tratamientos, genotipos, estados fenológicos y zonas, mientras que con la cámara multispectral RGNIR no se logró discriminar los genotipos ni los tratamientos, pero si se encontraron diferencias entre estados fenológicos y zonas.

Los índices NDVI, TNDVI, SRRE y NDRE generados a partir de firmas espectrales permiten diferenciar las variedades de chocho, F3 (ECU-2658 x ECU-8415) e I-451 Guaranguito. Obteniendo mejores resultados para el genotipo F3 (ECU-2658 x ECU-8415) debido a la arquitectura genética que este presenta para la adaptabilidad a diferentes condiciones edafoclimáticas. Si bien todos los índices de vegetación permiten diferenciar un genotipo de otro, los índices NDVI y TNDVI presentaron una mayor sensibilidad en las dos zonas.

Al analizar los métodos de control biológico mediante los índices NDVI, TNDVI, SRRE y NDRE generados a partir de firmas espectrales se establece que para la zona 1 la desinfección de semilla fue el mejor método para prevenir enfermedades y obtener una buena producción de chocho, a diferencia de la zona 2, donde la inoculación de *Bacillus* spp. en dos fases fenológicas dio mejores resultados que la desinfección de semilla. Es decir, para una zona seca es más adecuado

la inoculación de *Bacillus* y para una zona húmeda es más adecuado la desinfección de semilla por radiación solar.

Los índices NDVI, TNDVI, SRRE y NDRE generados a partir de firmas espectrales permiten caracterizar el desarrollo vegetativo del cultivo en las dos zonas e identificar cuál de las zonas favorece a su desarrollo, dando como resultado que la zona 2 presenta mejores características tanto en el tipo de suelo como en la precipitación anual requerida por el cultivo.

Los índices NDVI, TNDVI, GNDVI, SRG y SR generados a partir de imágenes multiespectrales permiten caracterizar el desarrollo vegetativo del cultivo e identificar cuál de las zonas es mejor para su desarrollo. El índice NDVI y TNDVI que utilizan la banda NIR establecen que la zona 2 presenta mejores características que la zona 1 en cuanto a la estructura celular de la planta, sin embargo, los índices que utilizan la banda verde determinan que la zona 1 es mejor que la zona 2 en cuanto a pigmentación de la planta.

La biomasa es la cantidad de materia orgánica resultante de un cultivo, en el caso del chocho al ser fijador de nitrógeno es una alternativa para abonar el suelo, en esto radica la importancia de tener mayor biomasa en la zona. Para este estudio la zona que generó mayor cantidad de biomasa total fue la zona 2 y el tratamiento que generó mayor biomasa fue el T6, mientras que para la zona 1 el mejor tratamiento fue el T1. Con estos resultados se puede determinar que el uso de sensores remotos permite la estimación de biomasa sin utilizar métodos destructivos.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar más proyectos de investigación asociados a la agricultura de precisión sobre cultivos nacionales para generar una fenoteca (biblioteca espectral de firmas fenológicas) que sirva como línea base para futuras investigaciones.

Se recomienda realizar estudios de caracterización de chocho mediante sensores remotos en zonas productivas para identificar los problemas reales a los que se enfrentan los agricultores con la aplicación de más índices de vegetación que utilicen bandas RGB.

En la estimación de biomasa se recomienda tener tratamientos en macetas donde se controlen los factores ambientales para comparar el factor de densidad que se genera a partir de las muestras en macetas y el tomado en campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamczyk, J., & Osberger, A. (2015). Red-edge vegetation indices for detecting and assessing disturbances in Norway spruce dominated mountain forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 37, 90–99.
- Aguero, S. (2018). Sistemas de producción de *Lupinus mutabilis* sweet ‘chocho’ en terrazas y laderas con fertilización fosfatada en Cajamarca. (*Tesis de maestría*). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.
- Apan, A., Held, A., Phinn, S., & Markley, J. (2003). Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO-1 Hyperion imagery for discriminating sugarcane disease. In *Proceedings of the Spatial Sciences Institute Biennial Conference (SSC 2003): Spatial Knowledge Without Boundaries*. Spatial Sciences Institute, 1-13.
- Aubert, B. A., Schroeder, A., & Grimaudo, J. (2012). IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers’ adoption decision of precision agriculture technology. . *Decision Support Systems*, 54(1), 510–520.
- Ballesteros, R., Ortega, J. F., Hernandez, D., & Moreno, M. A. (2018). Onion biomass monitoring using UAV-based RGB imaging. *Precision Agriculture*, 19(5), 840-857.
- Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 83–94.
- Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., . . . Moran, M. S. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA (Vol. 1619)*.
- Basso, B., Ritchie, J. T., Pierce, F. J., Braga, R. P., & Jones, J. W. (2001). Spatial validation of crop models for precision agriculture. . *Agricultural Systems*, 68(2), 97–112.
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging. *Remote sensing*, 6(11), 10395-10412.
- Benjamin, A., O’Brien, D., Barnes, G., Wilkinson, B., & Volkmann, W. (2017). Assessment of Structure from Motion (SfM) processing parameters on processing time, spatial accuracy, and geometric quality of unmanned aerial system derived mapping products. *J. Unmanned Aerial Syst*, 3(1), 27.
- Borgelt, S. C., Harrison, J. D., Sudduth, K. A., & Birrell, S. J. (1996). Evaluation of GPS for Applications in Precision Agriculture. . *Applied Engineering in Agriculture*, 12(6), 633–638.

- Bortolot, Z. J., & Wynne, R. H. (2005). Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(6), 342-360.
- Brow, J., Lu, T., Stevens, C., Khan, V., Wilson, C., Collins, D., . . . Droby, S. (2001). The effect of low dose ultraviolet light-C seed treatment on induced resistance in cabbage to black rot (*Xanthomonas campestris* pv. *campestris*). *Crop Protection*, 20, 873 - 883.
- Caicedo, C., & Peralta, E. (2000). *Zonificación potencial, sistemas de producción, y procesamiento artesanal del chocho (Lupinus mutabilis sweet) en Ecuador*. Quito, Ecuador.
- Caicedo, C., & Peralta, E. (2001). *El cultivo de chocho Lupinus mutabilis Sweet: Fitonutrición, Enfermedades y Plagas, en el Ecuador*. Quito, Ecuador.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition*. New York: Guilford Press.
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. . *Remote sensing*, 7(4), 4026-4047.
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. . *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252.
- Censo Nacional Agropecuario. (2003). El cultivo del chocho a través de los datos del III Censo Nacional Agropecuario. Proyecto SICA-Banco Mundial. 6pp. Delu, M., Paquot, M., Nyderland, T., 2005. Fenggycin interaction with lipid monolayers at the air-aqueous interface - implications. *Journal of Colloid and Interface Science*, 283, 358 - 365.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Planeta S. A.
- Condo, L., & Pazmiño, L. (2015). *Diseño experimental en el desarrollo del conocimiento científico de las ciencias agropecuarias*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.
- Contreras, S., & López, P. (2009). *Diseño de bloques completos al azar en la investigación agroecológica*.
- Datt, B. (1999). Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves. . *International Journal of Remote Sensing*, 20(14), 2741–2759.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., González, L., Tablada, E., Díaz, M., Robledo, C., & Balzarini, M. (2005). *Estadística para las Ciencias Agropecuarias*. Córdoba.
- 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.
- Dirección Regional de Agricultura Cajamarca. (2017). *Manual del cultivo de Tarwi*. Cajamarca.

- Eisenbeib, H. (2009). UAV photogrammetry. (*Doctoral dissertation, ETH Zurich*).
- Falconí, C. (2012). *Lupinus mutabilis* in Ecuador with special emphasis on anthracnose resistance. (*Tesis de doctorado*). Wageningen University, Wageningen.
- Falconí, C. E., & Yáñez- Mendizábal, V. (2018). Efficacy of UV- C radiation to reduce seedborne anthracnose (*Colletotrichum acutatum*) from Andean lupin (*Lupinus mutabilis*). *Plant pathology*, 67(4), 831-838.
- Falconí, C., Visser, R., & van Heusden, A. (2013). Phenotypic, Molecular and Pathological Characterization of *Colletotrichum acutatum* Associate with Andean Lupine and Tamarillo in the Ecuador Andes. *Plant Dis*, 97, 819-827.
- Felicísimo, A., & Cepedal, G. (1984). Estimación de la radiación solar incidente sobre superficies con pendiente y orientación variables. *Studia OEcología*, 5, 267-284.
- Fiore, P. D. (2001). Efficient linear solution of exterior orientation. . *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(2), 140–148.
- Fitzgerald, G. J., Rodriguez, D., Christensen, L. K., Belford, R., Sadras, V. O., & Clarke, T. R. (2006). Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. . *Precision Agriculture*, 7(4), 233–248.
- Fu, B., & Burgher, I. (2015). Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. *Journal of Arid Environments*, 113, 59–68.
- Fuentes, J. (2012). Modelo digital de superficie a partir de imágenes de satélite Ikonos para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 41(2), 251-266.
- Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N., & Christy, A. (2015). Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. . *Procedia Computer Science*, 57, 1199–1210.
- García, E., & Flego, F. (2008). Agricultura de precisión. *Revista Ciencia y Tecnología*.
- García, J., & Martínez, J. (2014). Biomasa y Biotecnología. *Sociedad Española de Microbiología (SEM)*(58), 45-47.
- Gascon, M., Cirach, M., Martínez, D., Dadvand, P., Valentín, A., Plasència, A., & Nieuwenhuijsen, M. J. (2016). Normalized difference vegetation index (NDVI) as a marker of surrounding greenness in epidemiological studies: The case of Barcelona city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 19, 88-94.
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision Agriculture and Food Security. . *Science*, 327(5967), 828–831.

- Gil-Docampo, M. L., Arza-García, M., Ortiz-Sanz, J., Martínez-Rodríguez, S., Marcos-Robles, J. L., & Sánchez-Sastre, L. F. (2019). Above-ground biomass estimation of arable crops using UAV-based SfM photogrammetry. *Geocarto International*, 1-13.
- Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1996). Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of plant physiology*, 148(3-4), 494-500.
- Gitelson, A., & Merzlyak, M. N. (1994). Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143(3), 286-292.
- Godoy, L., & Luna, P. (2019). *Análisis y caracterización espectral del chocho (Lupinus Mutabilis Sweet) por los efectos de tratamientos de desinfección de semilla*. Sangolquí, Ecuador.
- Grenzdörffer, G. J., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. . *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 31(B3), 1207-1214.
- Grijalva, A. (2015). Evaluación de *Bacillus* spp. y sus metabolitos en el control biológico de ovularia y fusarium en chocho (*lupinus mutabilis* sweet). (*Tesis de pregrado*). Universidad de la Americas, Quito.
- Grussenmeyer, P., & Khalil, O. A. (2002). Solutions for exterior orientation in photogrammetry: a review. . *The Photogrammetric Record*, 17(100), 615–634.
- Gu, Y., Hunt, E., Wardlow, B., Basara, J. B., Brown, J. F., & Verdin, J. P. (2008). Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. *Geophysical Research Letters*, 35(22).
- Guaytarilla, P., & Falconí, C. (2014). Selección por arquitectura de la planta y resistencia a la Antracnosis de 7 Genotipos de Chocho (*lupinus mutabilis*). Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Congreso de Ciencia y Tecnología (ISSN:1390-4663).
- Gutiérrez, H., & de la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. Mexico D.F.: McGRAW-HILL.
- Habib, A. F., Kim, E. M., & Kim, C. J. (2007). New Methodologies for True Orthophoto Generation. . *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(1), 25–36.
- Heipke, C. (1997). Automation of interior, relative, and absolute orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(1), 1–19.
- Herold, M., Gardner, M. E., & Roberts, D. A. (2003). Spectral resolution requirements for mapping urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(9), 1907–1919.

- Hlavka, A., Haralick, R., Carlyle, S., & Yokoyama, R. (1980). The Discrimination of Winter Wheat Using a Growth-State Signature. *Remote Sensing of Environment*, 9, 277-294.
- Huesca, M., Litago, J., Escribano, P., Palacios, A., & Merino, S. (2009). *Utilidad del índice espectral as1 para caracterizar tipos de vegetación en zonas bioclimáticas distintas mediante análisis de series de tiempo*. Calatayud.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X., & Ferreira, L. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195–213.
- Jacobsen, S., & Sherwood, S. (2002). *Cultivo de granos andinos en el Ecuador*. Quito: Abaya-Yala.
- Jacobsen, S.-E., & Mujica, A. (2006). El tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet.) y sus parientes silvestres. *Botánica Económica de los andes centrales*, 28, 458-482.
- Jacobsen, S.-E., & Mujica, A. (2008). Geographical distribution of the Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet). *Plant Genetic Resources Newsletter (Rome, Italy)*, 155, 1-8.
- Jiang, R., Jáuregui, D. V., & White, K. R. (2008). Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review. *Measurement*, 41(8), 823–834.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 101(3), 366–378.
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf- area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50(4), 663-666.
- Joseph, G. (2005). *Fundamentals of Remote Sensing*. Universities Press.
- Karjalainen, M., Hyypä, J., & Kuittinen, R. (2006). Determination of Exterior Orientation Using Linear Features from Vector Maps. *The Photogrammetric Record*, 21(116), 329–341.
- Kempeneers, P., De Backer, S., Debruyn, W., Coppin, P., & Scheunders, P. (2005). Generic wavelet-based hyperspectral classification applied to vegetation stress detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(3), 610–614.
- Kraus, K. (2011). *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. Walter de Gruyter.
- Lescanno, J. (1994). *Genética y mejoramiento de Cultivos Altoandinos*. Puno, Perú: Programa nterinstitucional de Waru Waru. Convenio: INADE/PELT COTESU.
- Li, F., Miao, Y., Feng, G., Yuan, F., Yue, S., Gao, X., . . . Chen, X. (2014). Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research*, 157, 111–123.

- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2004). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Loachamín, A. (2017). Análisis del cambio de uso de suelo de la parroquia rural Calderón del Distrito Metropolitano de Quito entre los años 2005 y 2015 como aporte a la actualización del PDOT de Calderón.
- Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34(1), 179-204.
- Mandal, U. K., Victor, U. S., Srivastava, N. N., Sharma, K. L., Ramesh, V., Vanaja, M., . . . Ramakrishna, Y. S. (2007). Estimating yield of sorghum using root zone water balance model and spectral characteristics of crop in a dryland Alfisol. *Agricultural Water Management*, 87(3), 315-327.
- Martínez, A., & Leyva, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales*, 35(1), 11-20.
- Matías Bejarano, J. (2013). Técnicas de fotogrametría y visión por computador para el modelado 3D de estructuras geomorfológicas dinámicas. (*Doctoral dissertation, Universidad de Extremadura*).
- Mesas-Carrascosa, F. J., Clavero Rumbao, I., Torres-Sánchez, J., García-Ferrer, A., Peña, J. M., & López Granados, F. (2016). Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2161-2176.
- Moran, M. S., Inoue, Y., & Barnes, E. M. (1997). Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*, 61(3), 319-346.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. . *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371.
- Neményi, M., Mesterházi, P. Á., Pecze, Z., & Stépán, Z. (2003). The role of GIS and GPS in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 40(1-3), 45–55.
- Nguema, A., Norton, G. W., Alwang, J., Taylor, D. B., Barrera, V., & Bertelsen, M. (2013). Farm-level economic impacts of conservation agriculture in Ecuador. *Experimental Agriculture*, 49(1), 134-147.
- Ongena, M., Henry, G., & Thonart, P. (2009). The Roles of Cyclic Lipopeptides in the Biocontrol Activity of *Bacillus subtilis*. *Recent Developments in Management of Plant Diseases*, 59–69.
- Ortega, R., & Flores, L. (2013). *Agricultura de precisión: Introducción al manejo sitio-específico*. Chillán, Chile.

- Patel, N. K., Singh, T. P., Sahai, B., & Patel, M. S. (1985). Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attributes. *International Journal of Remote Sensing*, 6(5), 657-664.
- Peralta, E., Rivera, M., Murillo, A., & Monar, C. (2010). Iniap 451 Guaranguito nueva variedad para la provincia de Bolívar. *Boletín divulgativo*, 382.
- Perez-Ruiz, M., Slaughter, D. C., Gliever, C., & Upadhyaya, S. K. (2012). Tractor-based Real-time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant. . *Biosystems Engineering*, 111(1), 64–71.
- Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jedrzejewska, B., Lima, M., & Kausrud, K. (2011). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. . *Climate Research*, 46(1), 15-27.
- Piazzese, J., & Oñate, E. (2018). Metodología para la obtención de información geográfica, geofísica y geo-ambiental desde imágenes satelitales. *Research Report, N° PI244* .
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy Volume 67*, 1–85.
- Popescu, S. C. (2009). Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. *Biomass and Bioenergy*, 31(6), 646-655.
- Primicerio, J., Di Gennaro, S. F., Fiorillo, E., Genesio, L., Lugato, E., Matese, A., & Vaccari, F. P. (2012). A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. . *Precision Agriculture*, 13(4), 517-523.
- Raczynski, R. J. (2017). Accuracy analysis of products obtained from UAV-borne photogrammetry influenced by various flight parameters. (*Master's thesis, NTNU*).
- Raynolds, M., Comiso, J., Walker, D., & Verbyla, D. (2008). Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1884–1894.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 38(1), C22.
- Richards, J. A. (2013). *Remote sensing digital image analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Rodríguez, V., & Bullock, S. (2013). Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4, 23-28.
- Rouse, J. J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec Publ 351:309* .

- Roy, D. P., Kovalskyy, V., Zhang, H. K., Vermote, E. F., Yan, L., Kumar, S. S., & Egorov, A. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment*, 185, 57-70.
- Sabins, F. F. (2007). *Remote Sensing: Principles and Applications*. Waveland Press.
- Sánchez García, E. (2019). Photogrammetry and image processing techniques for beach monitoring. (*Doctoral dissertation*).
- Schowengerdt, R. A. (2006). *Remote sensing: models and methods for image processing*. Tucson: Elsevier.
- SIGTIERRAS. (2017). Memoria explicativa del Mapa de Órdenes de Suelos del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Stafford, J. V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(3), 267-275.
- Sun, H., Slaughter, D. C., Ruiz, M. P., Gliever, C., Upadhyaya, S. K., & Smith, R. F. (2010). RTK GPS mapping of transplanted row crops. . *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(1), 32–37.
- Tapia, M. (2015). *Tarwi, Lupino Andino*. Lima, Perú: Equipo Técnico FADV Perú.
- Terán. (2016). Pretratamiento de semillas con radiación solar y su efecto en la incidencia de antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) en dos etapas fenológicas de chocho (*Lupinus mutabilis*). (*Tesis pregrado*). Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí.
- Tian, F., Brandt, M., Liu, Y. Y., Verger, A., Tagesson, T., Diouf, A. A., & Fensholt, R. (2016). Remote sensing of vegetation dynamics in drylands: Evaluating vegetation optical depth (VOD) using AVHRR NDVI and in situ green biomass data over West African Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 265-276.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., & Steininger, M. (2003). Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(6), 306-314.
- Vicente-Serrano, S. M., Camarero, J. J., Olano, J. M., Martín-Hernández, N., Peña-Gallardo, M., Tomás-Burguera, M., . . . El Kenawy, A. (2016). Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. *Remote Sensing of Environment*, 187, 14-29.
- Vogelmann, J. E., Rock, B. N., & Moss, D. M. (1993). Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. . *International Journal of Remote Sensing*, 14(8), 1563–1575.

- Wang, G., & Weng, Q. (2013). *Remote Sensing of Natural Resources*. CRC Press.
- Yáñez-Mendizábal, V., & Falconí, C. (2018). Efficacy of *Bacillus* spp. to biocontrol of anthracnose and enhance plant growth on Andean Lupin seeds by lipopeptide production. *Biological Control*, 67-75.
- Yáñez-Mendizábal, V., Falconí, C., & Grijalba, A. C. (2015). *Bacillus* spp. evaluation to control anthracnose infection on Andean lupin seed (*Lupinus mutabilis* Sweet). *Phytopathology*, 105(S4), 153.
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., & Tucker III, C. J. (2016). Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales. *SpringerBriefs in Environmental Science*.
- Zhang, M., Qin, Z., Liu, X., & Ustin, S. L. (2003). Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(4), 295–310.
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. . *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2-3), 113–132.