



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**

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

**TEMA: “RELACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPECTRAL
MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN QUINUA
(*Chenopodium quinoa*) EN UN ENSAYO CONTROLADO Y UN
CULTIVO COMERCIAL”**

**AUTORES: MORA VILLACÍS, MARÍA GABRIELA
CAÑARTE RUIZ, DANIEL ALEJANDRO**

DIRECTOR: KIRBY POWNEY, EDUARDO PATRICIO

SANGOLQUÍ

2017

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *“RELACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPECTRAL MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN QUINUA (*Chenopodium quinoa*) EN UN ENSAYO CONTROLADO Y UN CULTIVO COMERCIAL”* realizado por los señores *MORA VILLACÍS MARÍA GABRIELA* y *CAÑARTE RUIZ DANIEL ALEJANDRO*, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software de similitud y además cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas - ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo a autorizar a los señores *MORA VILLACÍS MARÍA GABRIELA* y *CAÑARTE RUIZ DANIEL ALEJANDRO* para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 23 de noviembre del 2017

Atentamente,

EDUARDO KIRBY POWNEY
DIRECTOR

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

Nosotros, *MORA VILLACÍS MARÍA GABRIELA*, con cédula de identidad N° 171817567-0, y *CAÑARTE RUIZ DANIEL ALEJANDRO*, con cédula de identidad N° 172153021-8, declaramos que este trabajo de titulación ***“RELACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPECTRAL MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN QUINUA (*Chenopodium quinoa*) EN UN ENSAYO CONTROLADO Y UN CULTIVO COMERCIAL”*** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

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

Sangolquí, 27 de noviembre del 2017

María Gabriela Mora Villacís
C.C 171817567-0

Daniel Alejandro Cañarte Ruiz
C.C 172153021-8

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

Nosotros, *MORA VILLACÍS MARÍA GABRIELA* y *CAÑARTE RUIZ DANIEL ALEJANDRO*, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar en Repositorio Institucional el presente trabajo de titulación “*RELACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPECTRAL MEDIANTE ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN QUINUA (Chenopodium quinoa) EN UN ENSAYO CONTROLADO Y UN CULTIVO COMERCIAL*” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 27 de noviembre del 2017

María Gabriela Mora Villacís
C.C 171817567-0

Daniel Alejandro Cañarte Ruiz
C.C 172153021-8

DEDICATORIA

Al dador de la vida,
a mi fuente de amor y fuerza,
al ser que amo con todo el corazón,
al que le debo todo lo que soy,
a mi Padre eterno,
a Dios.

A mis tres pilares fundamentales,
los que comparten mis alegrías y pesares,
los que me brindan siempre su apoyo incondicional,
las personas más maravillosas que Dios pudo regalarme,
los que un día me vieron partir de casa en busca de un futuro mejor,
los que veían mi cama vacía hasta el fin de semana.
Papi Cesitar, Mami Chelita, Ñañita Ma. José.

A la tía Yoli,
que nunca dejó de confiar en Dios
a pesar de la dura enfermedad con la que le tocó luchar.
Su vida es un ejemplo de fe y fortaleza.
Aunque ya no estás con nosotros,
Sé que desde arriba estás orgullosa de mí.

Gabriela Mora V.

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedicó primeramente a Dios, por ayudarme a salir de cada situación en la que me encontraba, por ser mi amigo fiel, el que nunca falla.

Se la dedico a mi familia, especialmente a mis padres Luis y Ximena; mis hermanos Luis, José, Margarita y Belén; y a mis abuelitos Luis y Ma. Ofelia quien está en el cielo.

Dedico esta tesis a Jeff por ser una persona especial para mí y por nunca dejarme dar por vencido.

A Carlitos por permitirme conocer de Jesús y por su apoyo.

Y a mi compañera de tesis, por su paciencia, apoyo y enseñarme muchas cosas, entre los más valioso a Jesús.

Daniel Cañarte R.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por estar en cada paso de mi vida, en cada meta, en la tormenta y en la calma, por el amor con el que me inunda cada mañana.

A mis padres y hermana. El apoyar mis estudios lejos de ustedes fue uno de los actos de amor más grandes que han hecho por mí. La vida no me alcanza para agradecerles.

Al resto de mi familia, principalmente a mi abuelita linda, a la ñaña Ceci y a la Danny. Sus mensajes de aliento tan oportunos me animaron siempre.

A mi compañero de tesis Daniel. Desde prepo, tantos años, amanecidas, trabajos en grupo; y para culminar, la tesis. Gracias por este tiempo, por la amistad.

A los que me acompañaron a lo largo de este camino universitario, a esos amigos que hacen que la vida sea más linda; particularmente a Katitta, Daysita, Migue y Michu.

A los amigos que me ha regalado la música, la iglesia, el trabajo, el fútbol. Sus palabras de ánimo también me motivaron a lograr mis objetivos. Gracias por estar, especialmente a ti, Génesis.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE; sin duda, una de las mejores etapas de mi vida la viví aquí. Y a los profes que me guiaron en este tiempo, principalmente al Ing. Luna, Ing. Diaz, Ing. Aguilera, Ing. A. Pérez, Dra. Débora.

Al Ing. Eduardo Kirby, director del proyecto; e Ing. Oswaldo Padilla, oponente. Gracias a sus recomendaciones y conocimiento compartido, este proyecto ha sido posible. Gracias por sembrar en nosotros la buena semilla de los Sensores Remotos, los SIG y la Fotogrametría.

Al Instituto Espacial Ecuatoriano, a través del Ing. Javier Manguashca; infinitas gracias por su tiempo, consejos, conocimiento y gestión en el préstamo de equipos. Al Ing. Leónidas Monterroso, por su valioso apoyo en el préstamo del UAV; al Ing. Emilio Basantes, por permitirnos muestrear sobre su ensayo de quinoa.

Gabriela Mora V.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por ser mi fortaleza y mi sustento.

A mis padres por su apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida.

A mi hermano Luis por ser un gran ejemplo para mis hermanos y para mí; y mis a mis demás hermanos, José, Margarita y Belén por su apoyo y carisma.

A Jeff por cada palabra de aliento, por estar ahí siempre cuando la necesitaba y por todo el apoyo brindado.

A mi líder Carlitos, por cada consejo y por ayudarme cada día a ser una mejor persona.

A Gabita por todo su apoyo, enseñanzas y por cada trabajo realizado con éxito durante toda nuestra etapa universitaria.

A todos mis maestros de la Universidad por los conocimientos impartidos, especialmente a los ingenieros Eduardo Kirby, Oswaldo padilla y Marco luna.

Al IEE por el apoyo en los equipos, especialmente al ingeniero Javier Maihuashca por todo su apoyo junto con Alex.

A Leónidas por auspiciarnos el vuelo con UAV, herramienta clave en este proyecto de investigación.

Daniel Cañarte R.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Estudios relacionados.....	3
1.3 Planteamiento del problema	4
1.4 Justificación e importancia	4
1.5 Descripción del Área de Estudio	5
1.6 Objetivos	8
1.6.1 Objetivo General.....	8
1.6.2 Objetivos Específicos.....	8
1.7 Metas del Proyecto	8
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
2.1 Teledetección	9
2.2 Resoluciones en imágenes	10
2.3 Espectro electromagnético.....	11
2.3.1 Luz ultravioleta (UV).....	13
2.3.2 Luz o radiación visible (VIS).....	13
2.3.3 Luz o radiación infrarroja (IR).....	13
2.4 Firma espectral	14
2.4.1 Firmas espectrales y reflectancia en la vegetación	14
2.4.2 Firmas espectrales y reflectancia en el suelo.....	16
2.5 Índices de vegetación	17
2.5.1 Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI)	17
2.5.2 Índice de Contenido de Clorofila (CCI).....	18
2.5.3 Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).....	19
2.5.4 Índice de Área Foliar (LAI)	20
2.5.5 Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR)	21
2.6 Fotogrametría	22
2.6.1 Clasificación	22
2.6.2 Imagen digital	24
2.6.3 Técnicas de orientación.....	24
2.6.4 Aerotriangulación	26

2.6.5 Ortofoto	26
2.7 Equipos.....	26
2.7.1 Espectroradiómetro FieldSpec Hi Res 4	26
2.7.2 Ceptómetro AccuPAR LP-80.....	28
2.7.3 Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV).....	29
2.7.3.1 UAV DJI Matrice 100	32
2.7.3.2 Cámara Zenmuse X3	33
2.7.3.3 Cámara Parrot Sequoia	34
2.7.4 GNSS/GPS Trimble R8	36
2.8 Diseño Experimental	37
2.8.1 Diseño de Bloques Completos al Azar (DCBA)	38
2.8.1.1 Análisis de Varianza (ADEVA) para DBCA.....	39
2.8.1.2 Prueba de separación de medias: Prueba de Tukey.....	41
2.9 Agricultura	41
2.9.1 Agricultura de precisión (AP)	41
2.9.2 Cultivo	42
2.9.3 Manejo agronómico	43
2.9.3.1 Labranza.....	43
2.9.3.2 Siembra	44
2.9.3.3 Fertilización.....	45
2.9.3.4 Riego	45
2.9.3.5 Control de enfermedades y plagas	46
2.9.3.6 Aporque.....	47
2.9.3.7 Cosecha	47
2.9.4 Suelos	48
2.10 Quinoa	50
2.10.1 Origen y distribución	50
2.10.2 Taxonomía	52
2.10.3 Propiedades nutricionales	53
2.10.4 Descripción botánica.....	53
2.10.5 Fenología	55
2.10.6 Variedades	56
2.10.7 Manejo agronómico del cultivo	57
2.10.8 Usos.....	58
2.11 Estadística	59
2.11.1 Análisis de correlación.....	59
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	61
3.1 Materiales y equipos.....	62
3.1.1 Materiales y equipos de campo	62
3.1.2 Materiales y equipos de gabinete	63
3.2 Ensayo Controlado (EC).....	63
3.2.1 Planificación	63
3.2.2 Captura y procesamiento de datos espectrales en cada muestreo	66

3.3.2.1 Muestreo preliminar en EC.....	66
3.3.2.2 Muestras 1, 2 y 3 en EC.....	70
3.2.3 Captura y procesamiento de datos para LAI y PAR en cada muestreo.....	74
3.3 Cultivo Comercial (CC)	77
3.3.1 NDVI mediante UAV	77
3.3.2 NDVI mediante espectroradiómetro	86
3.3.3 Correlación de datos obtenidos	90
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	93
4.1. Resultados del Ensayo Controlado	93
4.1.1 Resultados de la selección de la ecuación para cálculo de SAVI y su análisis estadístico	93
4.1.2 Resultados de NDVI y su análisis estadístico	95
4.1.2.1 Análisis de NDVI según tratamientos	97
4.1.2.2 Análisis de NDVI según repeticiones	98
4.1.2.3 Análisis de NDVI según estados fenológicos	99
4.1.3 Resultados de CCI y su análisis estadístico.....	100
4.1.3.1 Análisis de CCI según tratamientos.....	101
4.1.3.2 Análisis de CCI según repeticiones	103
4.1.3.3 Análisis de CCI según estados fenológicos	103
4.1.4 Resultados de SAVI y su análisis estadístico	104
4.1.4.1 Análisis de SAVI según tratamientos	106
4.1.4.2 Análisis de SAVI según repeticiones.....	107
4.1.4.3 Análisis de SAVI según estados fenológicos.....	108
4.1.5 Resultados de la relación entre índices de vegetación.....	109
4.1.6 Resultados de LAI y PAR y su análisis estadístico	111
4.1.6.1 Análisis de LAI y PAR según tratamientos	112
4.1.6.2 Análisis de LAI y PAR según repeticiones.....	114
4.1.6.3 Análisis de LAI y PAR según estados fenológicos.....	115
4.2 Resultados del Cultivo Comercial	116
4.2.1 Resultados de los ortomosaicos	116
4.2.2 Resultados de NDVI obtenido con UAV	118
4.2.3 Resultados de NDVI obtenido con espectroradiómetro	120
4.2.4 Resultados de los análisis exploratorios	122
4.3.4.1 Análisis exploratorio de datos NDVI _E	123
4.3.4.2 Análisis exploratorio de datos NDVI ₁	125
4.3.4.3 Análisis exploratorio de datos NDVI ₂	127
4.2.5 Resultados de las correlaciones.....	128
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	130
5.1 Conclusiones	130
5.2 Recomendaciones.....	133
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyectos relacionados a nivel nacional e internacional.....	3
Tabla 2. Ubicación geográfica del ensayo controlado	6
Tabla 3. Ubicación geográfica del área comercial.....	7
Tabla 4. División del espectro electromagnético.....	12
Tabla 5. Características del Espectroradiómetro FieldSpec Hi Res 4.....	27
Tabla 6. Especificaciones del Ceptómetro AccuPAR LP-80.....	28
Tabla 7. Especificaciones del UAV DJI Matrice 100.....	32
Tabla 8. Especificaciones de la cámara Zenmuse X3.....	33
Tabla 9. Especificaciones de la cámara multiespectral Parrot Sequoia.....	36
Tabla 10. Especificaciones del GPS de precisión Trimble R8.....	37
Tabla 11. Esquema general del ADEVA para DCBA	40
Tabla 12. Clasificación taxonómica de la quinua	52
Tabla 13. Tipos de correlación	60
Tabla 14. Tiempos de muestreo	65
Tabla 15. Anchos de banda y valores promedio de satélites seleccionados.....	68
Tabla 16. Variables del diseño experimental.....	73
Tabla 17. Variables ingresadas del vuelo con UAV	79
Tabla 18. Variables resultantes del vuelo con UAV	80
Tabla 19. Cálculo del tamaño de píxel del espectroradiómetro	88
Tabla 20. ADEVA del muestreo preliminar	94
Tabla 21. Prueba de Tukey para sensores utilizados	94
Tabla 22. ADEVA para NDVI.....	96
Tabla 23. Prueba de Tukey para NDVI según tratamiento	97
Tabla 24. Prueba de Tukey para NDVI según repetición	98
Tabla 25. Prueba de Tukey para NDVI según estado fenológico	99
Tabla 26. ADEVA para CCI	101
Tabla 27. Prueba de Tukey para CCI según tratamiento	102
Tabla 28. Prueba de Tukey para CCI según repetición.....	103
Tabla 29. Prueba de Tukey para CCI según estado fenológico	104
Tabla 30. ADEVA para SAVI.....	105
Tabla 31. Prueba de Tukey para SAVI según tratamiento.....	106
Tabla 32. Prueba de Tukey para SAVI según repetición.....	107
Tabla 33. Prueba de Tukey para SAVI según estado fenológico.....	108
Tabla 34. ADEVA para LAI	112
Tabla 35. ADEVA para PAR	112
Tabla 36. Prueba de Tukey para LAI según tratamiento	113
Tabla 37. Prueba de Tukey para PAR según tratamiento	113
Tabla 38. Prueba de Tukey para LAI según repetición.....	114

Tabla 39. Prueba de Tukey para PAR según repetición	114
Tabla 40. Prueba de Tukey para LAI según estado fenológico	116
Tabla 41. Prueba de Tukey para PAR según estado fenológico	116
Tabla 44. Resumen estadístico NDVI _E	123
Tabla 45. Resumen estadístico NDVI ₁	125
Tabla 46. Resumen estadístico NDVI ₂	127
Tabla 47. Resultados de las correlaciones	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del ensayo controlado.....	6
Figura 2: Mapa de ubicación del cultivo comercial.....	7
Figura 3. Formas de teledetección: (i) reflexión, (ii) emisión, (iii) emisión-reflexión.....	9
Figura 4. Espectro electromagnético	12
Figura 5. Firmas espectrales típicas para distintas coberturas	14
Figura 6. Firma espectral típica de vegetación y su comportamiento	15
Figura 7. Espectro de absorción para la clorofila	16
Figura 8: Comportamiento espectral de algunos tipos de suelo.....	17
Figura 9: Espectro de absorción de tres pigmentos: Clorofila a, Clorofila b y β caroteno.....	21
Figura 10: Clasificación de la fotogrametría	23
Figura 11: Imagen digital	24
Figura 12: Sistema de píxel y fotográfico (métrico).....	25
Figura 13: Orientación exterior	25
Figura 14: Parámetros de orientación.....	25
Figura 15: Espectroradiómetro FieldSpec Hi Res 4	27
Figura 16: Ceptómetro Accupar LP-80	28
Figura 17: Clasificación de los UAVs según el tipo de Aeronave.....	29
Figura 18: Clasificación de los UAVs.....	30
Figura 19: Principales aplicaciones de los UAVs.....	31
Figura 20: DJI Matrice 100.....	32
Figura 21: Cámara Zenmuse X3	33
Figura 22: Cámara multiespectral Sequoia.....	34
Figura 23: Sensor solar	35
Figura 24: Corrección de imágenes por medio de sensor de luz.....	35
Figura 25: Disposición de la cámara multiespectral y el sensor solar sobre un UAV.....	35
Figura 26: GNSS/GPS Trimble R8	37
Figura 27: Máquina de arado	44
Figura 28: Máquina para rastra	44
Figura 29: Métodos de siembra.....	44
Figura 30: Clasificación de enfermedades que afectan los cultivos.....	46
Figura 31: Tipos de suelo existentes en el Ecuador.....	48
Figura 32: Planta de quinua – variedad INIAP Tunkahuan	50
Figura 33: Distribución geográfica de la producción de la quinua en el mundo.....	51
Figura 34: Distribución de la quinua en el Ecuador	52
Figura 35: Partes de la planta de quinua.....	53
Figura 36: Panoja de quinua.....	54
Figura 37: Inflorescencia tipo panoja	54
Figura 38: Fases fenológicas de la quinua.....	55

Figura 39: Variedades vigentes de quinua en el Ecuador	57
Figura 40: Uso del grano de la quinua.....	59
Figura 41: Esquema generalizado del proceso	62
Figura 42: Esquema de distribución del ensayo y parcelas utilizadas	64
Figura 43: Parcela y área efectiva utilizada.....	65
Figura 44. Diagrama de flujo para muestreo preliminar	66
Figura 45: Esquema del muestreo inicial por parcela.....	67
Figura 46: Extracto tabla que contiene datos espectrales tomados por el espectroradiómetro	68
Figura 47: Extracto tabla longitud de onda vs reflectancias	69
Figura 48: Diagrama de flujo para muestreos 1, 2 y 3.....	71
Figura 49: Esquema de los muestreos 1, 2 y 3 por parcela.....	72
Figura 50: Extracto tabla longitud de onda vs reflectancias	73
Figura 51: Diagrama de flujo para toma de datos para LAI y PAR.....	74
Figura 52: Toma de datos con ceptómetro	75
Figura 53: Toma de datos con ceptómetro	75
Figura 54: Diagrama de flujo para la obtención de NDVI mediante UAV	77
Figura 55: Cultivo comercial de quinua	78
Figura 56: Ejemplo de uso de la app Map Pilot.....	78
Figura 57: UAV DJI Matrice 100.....	79
Figura 58: Despegue del UAV	79
Figura 59: Toma de GCP	80
Figura 60: Postprocesamiento de puntos de control en TBC.....	81
Figura 61: Coordenadas de los GCP postprocesados con TBC y sus precisiones.....	81
Figura 62: Módulo Mapas 3D en Pix4D	82
Figura 63: Módulo Ag Multiespectral en Pix4D	83
Figura 64: Target de calibración AIRINOV	84
Figura 65: Puntos de apoyo sobre ortomosaico RGB.....	85
Figura 66: RMS de la georeferenciación del mosaico Red.....	85
Figura 67: RMS de la georeferenciación del mosaico NIR	86
Figura 68: Cálculo de NDVI con Raster Calculator de ArcGIS	86
Figura 69: Diagrama de flujo para la obtención de NDVI mediante espectroradiómetro	87
Figura 70: Triángulo utilizado para la obtención del tamaño del pixel.....	88
Figura 71: Ejemplo de la tabla de reflectancias de cada punto	89
Figura 72: Extracto de la tabla con los valores NDVI para cada punto	90
Figura 73: Extracto de la tabla con las coordenadas obtenidas para cada punto.....	90
Figura 74: Metodología usada en la correlación de NDVI.....	91
Figura 75: Resultados de valores SAVI por tratamiento, repetición y sensor.....	94
Figura 76: Resultados de la prueba de Tukey para sensores utilizados	95
Figura 77: Resultados de valores NDVI por tratamiento, repetición y estado fenológico	96

Figura 78: Resultados de la prueba de Tukey para NDVI según tratamiento	97
Figura 79: Resultados de la prueba de Tukey para NDVI según repetición	99
Figura 80: Resultados de la prueba de Tukey para NDVI según estado fenológico	100
Figura 81: Resultados de valores CCI por tratamiento, repetición y estado fenológico	101
Figura 82: Resultados de la prueba de Tukey para CCI según tratamiento	102
Figura 83: Resultados de la prueba de Tukey para CCI según repetición.....	103
Figura 84: Resultados de la prueba de Tukey para CCI según estado fenológico	104
Figura 85: Resultados de valores SAVI según tratamiento, repetición y estado fenológico	105
Figura 86: Resultados de la prueba de Tukey para SAVI según tratamiento.....	106
Figura 87: Resultados de la prueba de Tukey para SAVI según repetición	107
Figura 88: Resultados de la prueba de Tukey para SAVI según estado fenológico.....	108
Figura 89: Índices de vegetación vs. dosis de fertilización.....	109
Figura 90: Índices de vegetación vs. Repeticiones	110
Figura 91: Índices de vegetación vs. estados fenológicos	111
Figura 92: Resultados de valores LAI y PAR según tratamiento, repetición y estado fenológico.....	111
Figura 93: Resultados de la prueba de Tukey para PAR según tratamiento	113
Figura 94: Resultados de la prueba de Tukey para LAI según repetición.....	115
Figura 95: Resultados de la prueba de Tukey para PAR según repetición	115
Figura 96: Ortomosaico RGB del cultivo comercial	117
Figura 97: Ortomosaicos Red y NIR del cultivo comercial, cámara Parrot Sequoia	118
Figura 98: Mapa NDVI ₁ vs. NDVI ₂ del cultivo comercial	119
Figura 99: Coordenadas de los puntos de muestreo y valores NDVI	121
Figura 100: Distribución espacial de los puntos muestreados en el cultivo comercial	121
Figura 101: Valores NDVI obtenidos del cultivo comercial	123
Figura 102: Histograma de datos NDVI _E	124
Figura 103: Diagrama de caja de datos NDVI _E	124
Figura 104: Histograma de datos NDVI ₁	126
Figura 105: Diagrama de caja de datos NDVI ₁	126
Figura 106: Histograma de datos NDVI ₂	127
Figura 107: Diagrama de caja de datos NDVI ₂	128

RESUMEN

En el presente proyecto, se plantea encontrar la relación entre índices de vegetación en quinua en un ensayo controlado y un cultivo comercial, tomando datos en campo mediante un sensor multiespectral aeroportado y un espectroradiómetro, con el fin de caracterizar espectralmente a este grano. Se recolectaron datos espectrales y de LAI y PAR en el ensayo controlado; mientras que en el cultivo comercial se realizó un vuelo con UAV y se tomaron datos espectrales. Como resultados dentro del ensayo controlado se obtuvieron: una ecuación en base a reflectancias para el cálculo de SAVI, valores de los índices NDVI, CCI y SAVI, firmas espectrales, curvas y gráficos comparativos; en cuanto al cultivo comercial, se capturaron imágenes RGB y multiespectrales a través de un UAV, con las que se obtuvieron ortomosaicos y mapas NDVI, además de valores numéricos de dicho índice. A través de estos datos tomados en el ensayo controlado, se ratificó la dosis óptima de fertilización nitrogenada en quinua, y se determinó que es posible una diferenciación entre quinua con y sin fertilizante y entre sus primeros estados fenológicos mediante métodos espectrales; además de la estrecha relación existente entre los índices NDVI, CCI y SAVI. Con los datos capturados en el cultivo comercial, se realizó un análisis de correlación, que dio como resultado valores de R^2 cercanos a cero y negativos, debido a que la quinua, al ser una planta herbácea, no posee una masa vegetal significativa, lo que ocasiona que NDVI se vea influenciado por la acción del suelo.

PALABRAS CLAVE:

- **ESPECTRORADIOMETRÍA**
- **ÍNDICES DE VEGETACIÓN**
- **QUINUA**
- **UAV**
- **CORRELACIÓN**

ABSTRACT

In the present project, to find the relationship between vegetation indexes in quinoa in a controlled experiment and a commercial crop, taking data through an airborne multispectral sensor and a spectroradiometer, in order to realize a spectral characterization of this grain is proposed. Spectral, LAI and PAR data were collected in controlled experiment; while a UAV flight was realized, and spectral data were taken in commercial crop. In controlled experiment, a SAVI reflectance-based equation; NDVI, CCI and SAVI indexes values; spectral signatures; curves and comparative graphs were obtained. In commercial crop, RGB and multispectral images were captured through an UAV; ortomosaics and NDVI maps were obtained, as well as numerical values of this index. Through taken data in controlled experiment, optimal nitrogen fertilization dose in quinoa was ratified; it is possible find differentiations between quinoa with and without fertilizer and between its first phenological stages by spectral methods; also, there is a close relationship between NDVI, CCI and SAVI indexes. With captured data in commercial crop, a correlation analysis was performed, that resulted in close to zero and negative R^2 values, because quinoa, being an herbaceous plant, does not have a significant vegetable mass, which causes that soil influences NDVI index.

KEY WORDS:

- **SPECTRORADIOMETRY**
- **VEGETATION INDEXES**
- **QUINOA**
- **UAV**
- **CORRELATION**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

La teledetección se define como la ciencia y arte de obtener información de un objeto a la distancia, mediante un dispositivo físico que no está en contacto físico con dicho objeto (Abreu, Cabrera, Fernández, & Icasuriaga, 2017). El empleo de la teledetección para el análisis y gestión de los recursos naturales se encuentra condicionado por las limitaciones en cuanto a las resoluciones de las imágenes disponibles (espacial, espectral y temporal); sin embargo, con la llegada de los vehiculados aéreos no tripulados (UAV) y con el desarrollo de microsensores, nace el concepto de teledetección de alta resolución (Díaz, 2015).

Aunque es poco probable que los UAV reemplacen completamente a los aviones tripulados o a los satélites, éstos tienen una gran ventaja sobre estos métodos tradicionales de teledetección, ya que permiten recolectar imágenes de alta resolución (espacial, espectral y temporal) por debajo del nivel de las nubes, son económicamente accesibles y fáciles de usar debido a la automatización del UAV y a la variabilidad de programas para el procesamiento de datos. Debido a estas bajas barreras de acceso, se espera que los UAV sean de gran apoyo a los agricultores de países en desarrollo, a quienes se les ha dificultado obtener imágenes aéreas (Greenwood, 2016).

Los UAV se han desarrollado en los últimos años como una plataforma versátil para la adquisición de imágenes con aplicaciones en diferentes campos, pero la agricultura de precisión y la seguridad pública, han sido los mercados más prometedores según un estudio realizado en estados unidos en el 2003, representando entre ambos un 90% de los mercados potenciales conocido para los UAV (Díaz, 2015). Según Fountas et. al (2003) citado por Diaz (2015), la agricultura de precisión es aquella que permite medir y manejar la variabilidad espacial y temporal a nivel de

subparcela de campo con el fin de aumentar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental de los cultivos.

Como herramienta para la obtención de información, la agricultura de precisión utiliza índices de vegetación como NDVI, SAVI, RDVI etc. los cuales son una fuente de información importante para el conocimiento, gestión y monitoreo del territorio, debido a que proporciona datos sobre el comportamiento de los cultivos y la evolución temporal de variables de interés relacionadas con el desarrollo, vigor vegetativo, diagnóstico de parámetros biofísicos, identificación de variables agronómicas, porcentaje de cobertura, y otras aplicaciones agronómicas (Mimbela, 2010). También es posible utilizar índices complementarios para obtener información de la planta, como por ejemplo LAI (Índice de Área Foliar), el que permite conocer variaciones en cuanto al área foliar de la planta; PAR (Radiación Fotosintéticamente Activa), que analiza la variación del área foliar en donde la planta realiza la fotosíntesis; o CCI (Índice de Contenido de Clorofila), con el que se puede medir la cantidad de clorofila presente en las hojas. Estos índices, pueden ser obtenidos mediante un sensor aerotransportado o a través de un espectroradiómetro; con los que se adquiere información importante en cada etapa fenológica a través de la respuesta espectral de la vegetación.

Por otro lado, el uso de las herramientas antes mencionadas en el campo de la agricultura contribuye a la investigación, desarrollo, producción y comercialización de cultivos de interés nacional como la quinua, la que, debido a su alto valor nutricional, es considerada como uno de los alimentos más completos a disposición del ser humano. Su contenido de proteína varía entre 13,81% y 21,9%, que es más del doble de cualquier otro cereal. Además, gracias a su alto contenido de aminoácidos, es conocida como el único alimento vegetal que provee todos los aminoácidos esenciales, ubicándose cerca de los estándares que dicta la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO) para la nutrición humana (Bojanic, 2011; Cuadrado, 2012).

1.2 Estudios relacionados

Varios autores han desarrollado investigaciones relacionadas a agricultura de precisión, utilizando técnicas de teledetección (UAV, índices de vegetación) aplicadas a otros cultivos. También existen estudios en quinua, pero sin utilizar las herramientas antes mencionadas. Los proyectos expuestos en la Tabla 1, son aquellos que se complementan con la presente investigación; algunos de ellos se han elaborado en el país como tesis de pregrado y otros se han realizado a nivel internacional.

Tabla 1.

Proyectos relacionados a nivel nacional e internacional

Autores	Tema	Lugar/Año de Publicación
Ortega, Carolina	Respuesta espectral del cultivo de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) en dos fases fenológicas durante el periodo invernal 2014	Universidad Central del Ecuador, 2015
Alcocer, Carina	Respuesta espectral del cultivo de cacao (<i>Theobroma cacao</i>) sobre un pasivo ambiental, en la provincia de Sucumbíos	Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, 2017
Mullo, Alfonso	Respuesta del cultivo de quinua (<i>Chenopodium quinoa</i> Wild) a tres tipos de abonos orgánicos, con tres niveles de aplicación, bajo el sistema de labranza mínima, en la comunidad, Chacabamba, Quishuar, provincia de Chimborazo	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2011
Escalante, J. Alberto	Área foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno	Chapingo - México, 1999
Camacho, R.; Garrido, O.; Lima, M.	Caracterización de nuevo genotipos de maíz (<i>Zea mays</i> L.) en relación a área foliar y coeficiente de extinción de luz	Aguarico – Venezuela, 1995
De la Casa, A.; Ovando, G.; Bressanini, L.; Rodríguez, A.; Martínez, J.	Uso del índice de área foliar y del porcentaje de cobertura del uso del suelo para estimar la radiación interceptada en papa	Universidad Nacional de Córdoba – Argentina, 2007

1.3 Planteamiento del problema

Según Peralta (2009), la quinua forma parte del grupo de cultivos y alimentos de origen andino que han sido olvidados o subutilizados por varias décadas y en vías de extinción en Ecuador; entre las causas se citan: el desconocimiento de los beneficios nutricionales y económicos de la quinua entre los agricultores y la falta de tecnificación de los cultivos, lo cual impide la modernización y mejoramiento de la calidad del mismo, aumento de la producción y reducción de gastos a mediano y largo plazo .

A pesar del apoyo del MAGAP para la promoción del cultivo de quinua, las investigaciones que hasta ahora se han desarrollado en el Ecuador se han centrado en el desarrollo y adaptación a diferentes zonas; sin embargo, no se han estudiado estos efectos ni se ha caracterizado espectralmente a este grano utilizando metodologías, herramientas y software modernos relacionados a la Teledetección y tecnologías como los UAV, evidenciando así la falta de aplicación de éstas en el seguimiento y control de este cultivo de gran importancia nutritiva. En cuanto a índices de vegetación como NDVI, CCI y SAVI, no se ha masificado su uso para conocer la vigorosidad y la cobertura vegetal de la planta en el suelo y su actividad fotosintética al combinarlos con índices como LAI y PAR, que permitirían posteriormente controlar el desarrollo del cultivo en las primeras etapas de crecimiento, y no solo de quinua, sino de otros de importancia nacional; impulsando así la agricultura de precisión, área en la que poco se ha incursionado en el país.

1.4 Justificación e importancia

Con el fin de mejorar el monitoreo de cultivos, la Teledetección, el uso de los UAV (por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle - Vehículo Aéreo no Tripulado) y la evaluación cuantitativa de la vegetación a través de índices, como NDVI, CCI y SAVI, constituyen una de las mejores aplicaciones de la percepción remota en el manejo de los recursos ambientales y la toma de decisiones (Quishpe,

2015). Es por esto que, resulta importante que en el Ecuador se prioricen y expandan estas herramientas en este ámbito, con lo que se logrará el establecimiento de los principios de agricultura de precisión; beneficiando a los agricultores con tecnología, ahorro de recursos monetarios y de tiempo, mejora en el rendimiento de sus cultivos, entre otros; y que al final, se traduce en desarrollo para el país.

Por otro lado, en la actualidad, se considera a la quinua como un producto estratégico debido a su calidad nutritiva, su amplia variabilidad genética, su adaptabilidad y su bajo costo de producción, lo que ayuda a contribuir a la seguridad y soberanía alimentaria del Ecuador (Bojanic, 2011). Hace tres décadas, este grano no tenía mayor trascendencia en los sistemas de producción y consumo del país; por lo que en marzo del 2013, que se estableció a dicho año como el Año Internacional de la Quinua, con el fin de resaltar el aporte cultural, nutricional, uso y promoción del cultivo en el ámbito de la soberanía alimentaria y la erradicación de la pobreza (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2017b). Es así que, los estudios relacionados a este grano contribuyen al desarrollo investigativo en el país, no solo en campos como la Teledetección, sino en Agronomía, Biotecnología, etc.

En conclusión, el presente proyecto sienta bases en el área de agricultura de precisión y demuestra que las herramientas de Teledetección, análisis espectrales y uso de nuevas tecnologías como los UAV, pueden aportar en gran manera a otras ciencias o áreas de conocimiento, como lo es la Agronomía.

1.5 Descripción del Área de Estudio

El proyecto comprende dos zonas de investigación que a continuación se explican:

Área de estudio del ensayo controlado: Corresponde a una extensión de terreno de aproximadamente 1.680 m², ubicada dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Campus IASA; en la que se realizó el monitoreo de un cultivo de

quinua para determinar diferencias espectrales a través de índices de vegetación. Su ubicación se puede apreciar en la Figura 1.

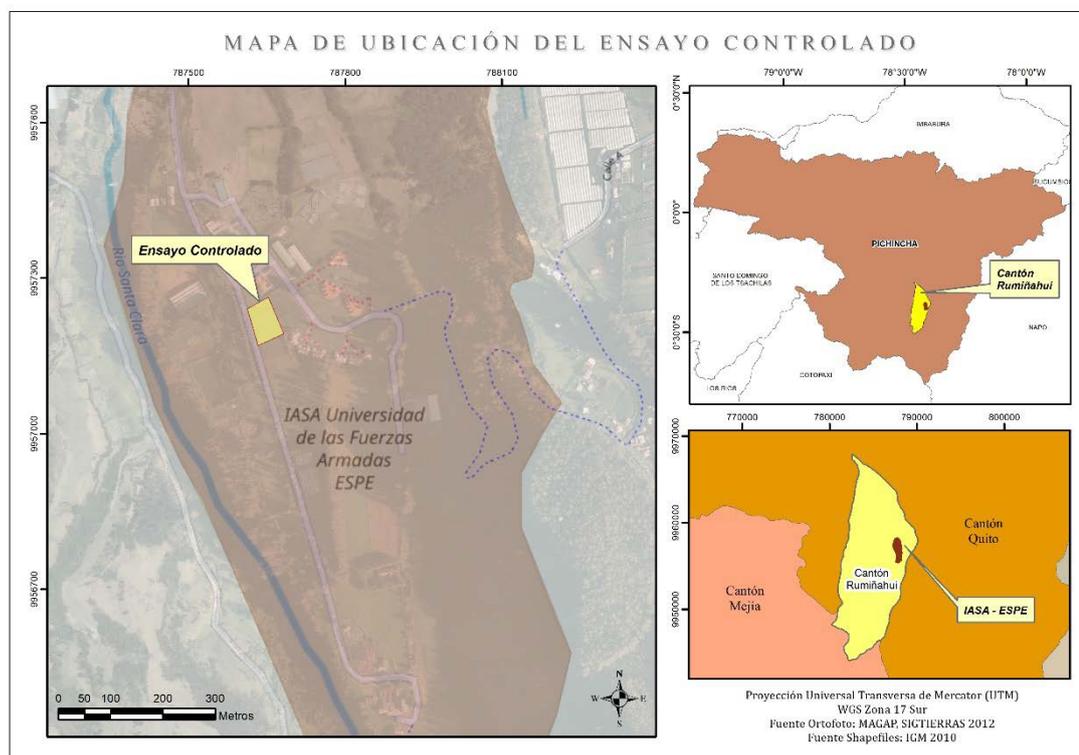


Figura 1. Mapa de ubicación del ensayo controlado

Las coordenadas de ubicación del ensayo se pueden apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2.

Ubicación geográfica del ensayo controlado

Provincia	Pichincha
Cantón	Rumiñahui
Parroquia	Sangolquí
Altitud	2722 m.s.n.m.
Longitud	78° 24' 54,65" O
Latitud	0° 23' 12,53" S
Zona	17 S
X	787.717 E
Y	9'957.201 N

Área de estudio del cultivo comercial: Este cultivo tiene una extensión aproximada de 1.7 Ha y se encuentra localizado en la Hacienda Comunitaria “Concepción de Monjas”, en la parroquia de Lloa, la cual está administrada por la

Asociación “Virgen del Volcán” (véase Figura 2). Este cultivo fue utilizado para establecer la correlación existente entre datos espectrales tomados con espectroradiómetro y con UAV.

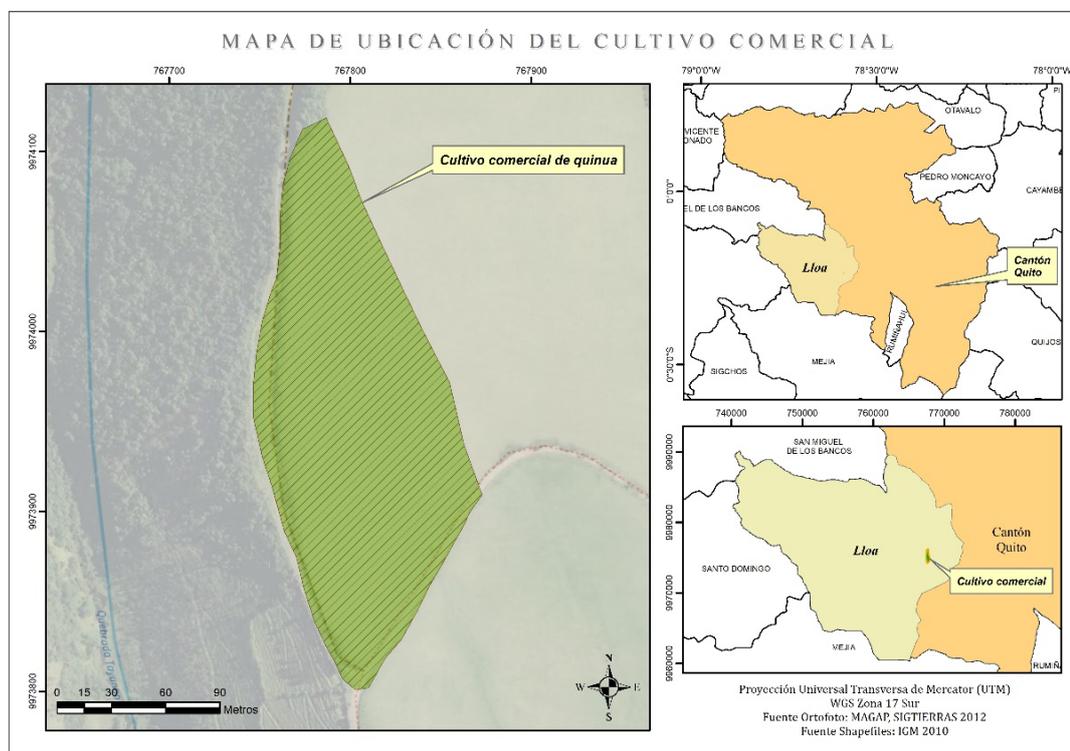


Figura 2: Mapa de ubicación del cultivo comercial

Las coordenadas de ubicación del área comercial a utilizar se pueden apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3.

Ubicación geográfica del área comercial

Provincia	Pichincha
Cantón	Quito
Parroquia	Lloa
Altitud	3150 m.s.n.m.
Longitud	78° 35' 36,62" O
Latitud	0° 14' 03,30" S
Zona	17 S
X	767.860 E
Y	9'974.085 N

1.6 Objetivos

1.6.1 *Objetivo General*

Encontrar la relación entre índices de vegetación (SAVI, NDVI, CCI) en quinua en un ensayo controlado y un cultivo comercial, tomando datos en campo mediante un sensor multiespectral aeroportado y un espectroradiómetro, con el fin de caracterizar espectralmente a este grano.

1.6.2 *Objetivos Específicos*

- Recolectar en campo datos espectrales en un cultivo de quinua controlado y comercial mediante un espectro radiómetro.
- Tomar en campo datos de LAI y PAR en un ensayo controlado utilizando un ceptómetro.
- Procesar los datos obtenidos del ensayo controlado, calcular los índices NDVI, CCI y SAVI y analizar estadísticamente los resultados con el fin de determinar la dosis óptima de fertilización mediante herramientas geoinformáticas y estadísticas.
- Obtener datos espectrales en un cultivo comercial mediante un sensor multiespectral aeroportado.
- Procesar los datos obtenidos del cultivo comercial (aeroportados y en campo), calcular el NDVI y encontrar la correlación entre ellos.

1.7 Metas del Proyecto

- Respuestas espectrales de quinua del ensayo controlado.
- Respuestas espectrales de quinua del cultivo comercial.
- Imagen multiespectral y NDVI tabulados del cultivo comercial.
- Datos de LAI y PAR de quinua del ensayo controlado.
- Curvas de NDVI, CCI, SAVI, LAI y PAR del ensayo controlado.
- Artículo científico

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Teledetección

De acuerdo con Chuvieco (2008), la Teledetección es la técnica que permite adquirir información a distancia de la superficie terrestre mediante el uso de sensores aéreos o espaciales. Para que exista una interacción entre los sensores y los objetos, deben actuar tres elementos principales: un sensor, un elemento a observar y el flujo energético que los pone en relación y permite la detección del objeto; dicho flujo puede tratarse de reflexión, emisión y emisión-reflexión, tal como se muestra en la Figura 3.

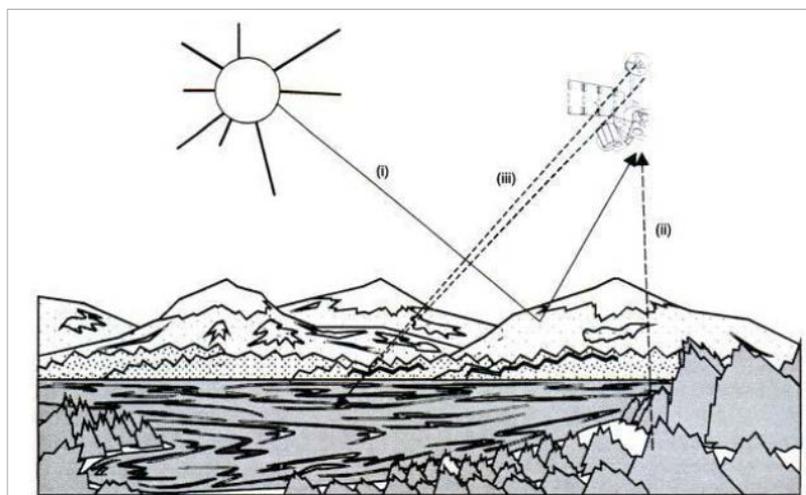


Figura 3. Formas de teledetección: (i) reflexión, (ii) emisión, (iii) emisión-reflexión

Fuente: (Chuvieco, 2008)

Existen varios conceptos, según Sarría & Palazón (2008), que permiten la comprensión de la Teledetección, los cuales son descritos a continuación:

- **Emitancia (M).**- Se refiere a la energía emitida desde una fuente por unidad de tiempo y de superficie. Se mide en $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$.

- **Irradiancia (E).**- Se define de manera similar a la emitancia pero referido a la energía que llega a un cuerpo procedente de otro que la ha emitido. Igualmente se mide en $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$.
- **Radiancia (L).**- Es el flujo radiante que abandona una unidad de área en una dirección particular siguiendo un ángulo sólido particular. Su importancia radica en que es la magnitud que detecta el sensor.
- **Reflectancia (ρ).**- También conocido como albedo, es la parte de la irradiancia que refleja la superficie receptora. Es adimensional.
- **Absorbancia (α).**- Es la parte de la irradiancia que absorbe la superficie receptora. Es adimensional.
- **Transmitancia (τ).**- Es la parte de la irradiancia que transmite la superficie receptora. Es adimensional.

Es importante que considerar que las radiancias espectrales, que son reflejadas desde la superficie terrestre hacia el sensor, dependen de muchos factores; entre ellos se encuentran: las variaciones de la irradiancia solar, las condiciones atmosféricas y meteorológicas, las propiedades reflectivas de la superficie y las condiciones del sensor (Sarría & Palazón, 2008).

2.2 Resoluciones en imágenes

Chuvieco (2008) define a la resolución de un sistema sensor como la habilidad que posee para registrar información de detalle, permitiendo su clara discriminación. Los tipos de resoluciones propuestos por Chuvieco (2008) se describen a continuación:

- **Resolución espacial:** Se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen. En los sensores ópticos, se suele usar el concepto de *campo de visión instantáneo* (*instantaneous field of view* - IFOV), el cual se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un determinado momento; sin embargo, se acostumbra a utilizar más bien la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo, teniendo en cuenta la altura de vuelo y la velocidad de exploración del sensor. Esa distancia se corresponde en el terreno

como la mínima unidad de información incluida en la imagen, lo cual se conoce como *píxel*, siendo una medida generalizada de resolución espacial.

- Resolución espectral: Indica el número y ancho de cada banda espectral que puede discriminar el sensor.
- Resolución radiométrica: Expresa la sensibilidad del sensor, es decir, su capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que capta. En los equipos ópticos, esta resolución se refiere al número de bits que necesita cada valor numérico para almacenarse.
- Resolución temporal: Hace referencia a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, es decir, la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de una misma área de la superficie terrestre.
- Resolución angular: Se define como la capacidad de un sensor que le permite observar una misma zona desde distintos ángulos.

2.3 Espectro electromagnético

Se define como el conjunto de todas las posibles frecuencias a las que se produce radiación electromagnética, la cual corresponde al flujo saliente de energía, cuya fuente son las ondas electromagnéticas, siendo de origen natural o artificial. Se dice que son posibles debido a que el rango conocido del espectro no tiene longitudes bien definidas, siendo la longitud de Planck ($1,616252 \cdot 10^{-35}$ m) la más pequeña y la longitud más grande el tamaño del universo mismo; es decir, desde casi cero hasta el infinito positivo. El espectro electromagnético también se define como la forma en que se distribuyen las ondas electromagnéticas, las cuales son la propagación en simultáneo de los campos eléctrico y magnético producidos por una carga eléctrica en movimiento (véase Figura 4). Sin embargo, el espectro electromagnético referido a un objeto es la radiación electromagnética que absorbe o emite (Luque, 2017; Casanova, 2013).

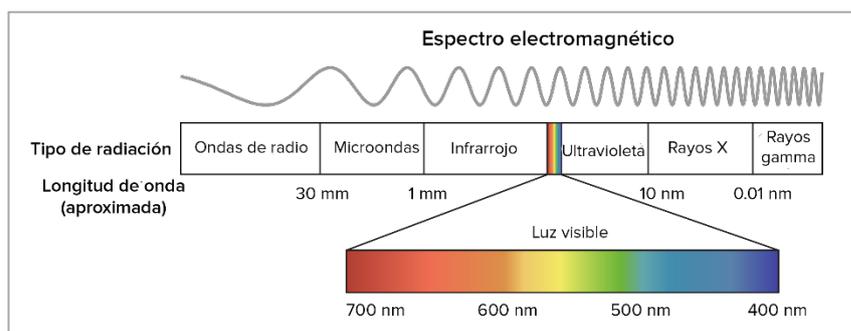


Figura 4. Espectro electromagnético

Fuente: (Khanacademy, 2017)

Varios autores han propuesto la división del espectro electromagnético con el fin de estudiarlo. En la Tabla 4 se visualiza la segmentación planteada por Ordiales (2007) y Chuvieco (2008), en donde se describen las denominaciones y sus respectivas longitudes de onda.

Tabla 4.

División del espectro electromagnético

Tipo de radiación	Denominación	Longitud de onda (λ)
Radiación indirectamente ionizante	Rayos Gamma	< 10 pm
	Rayos X	10 pm – 10 nm
Luz Ultravioleta	Ultravioleta Extremo (UVC)	10 - 280 nm
	Ultravioleta Medio (UVB)	280 – 315 nm
	Ultravioleta Cercano (UVA)	315 – 400 nm
Luz visible	Luz visible	0,4 – 0,7 μ m
Luz Infrarroja	Infrarrojo Cercano	0,7 μ m – 1,3 μ m
	Infrarrojo Medio	1,3 - 8 μ m
	Infrarrojo Lejano	8 μ m – 14 μ m
Microondas	Microondas	14 μ m – 30 cm
	Ultra alta frecuencia de radio (UHF)	30 cm – 1 m
Radio	Muy alta frecuencia de radio (VHF)	1 – 10 m
	Radio de onda corta	10 – 180 m
	Radio de onda media (AM)	180 – 650 m
	Radio de onda larga	650 m - 10 Km
	Radio de onda muy larga	> 10 Km

Fuente: (Ordiales, 2007; Chuvieco, 2008)

A continuación, se presenta una ampliación de las bandas ultravioleta, visible e infrarrojo, las cuales fueron utilizadas en el presente proyecto.

2.3.1 *Luz ultravioleta (UV)*

La radiación ultravioleta es aquella que se origina a partir de transiciones electrónicas de las capas exteriores de los átomos. Se detecta fácilmente, debido a que posee gran actividad fotoeléctrica y fotoquímica; sin embargo, la materia la absorbe con gran facilidad, lo que plantea problemas de transmisión en diferentes medios. La principal característica de la radiación UV es la posibilidad de producir excitaciones en los átomos, que provocan reacciones químicas (Sendra, 2008). Riofrío (2013) menciona que cuanto menor es la longitud de onda UV, mayor daño puede causar a los seres vivos, pero también es más fácilmente absorbida por la capa de ozono. Como se describe en la Tabla 4, esta radiación se clasifica en UVC, que es letal para toda forma de vida y es absorbida completamente por el ozono; UVB, que es menor letal que la primera, pero sigue siendo peligrosa, aunque está igualmente limitada por el ozono troposférico, aerosoles y nubes; y UVA, la menos perjudicial y que tiene la capacidad de atravesar el ozono.

2.3.2 *Luz o radiación visible (VIS)*

La Tabla 4 expresa que la luz visible se encuentra entre 400 y 700 nm, siendo el rango para el cual el ojo humano está adaptado. La luz visible puede definirse como “cualquier radiación capaz de actuar sobre la retina del ojo humano y que causa una sensación visual” (Schröder Group, 2017). Los colores que los seres humanos observan son las longitudes de onda de luz transmitidas por una solución, mientras que el color que absorbe es el complementario del color que transmite. Su principal fuente es el sol (García, 2010; Abril et. al, 2009).

2.3.3 *Luz o radiación infrarroja (IR)*

La luz infrarroja se ubica en el rango de los 0,7 μm hasta 14 μm y es aquella emitida por las moléculas que poseen temperaturas superiores al cero absoluto (-273 °K) (García, 2010). El sol es la principal fuente natural de radiación infrarroja, la cual constituye el 59% del espectro de emisión solar total. En cuanto a las fuentes artificiales de producción de luz infrarroja, se pueden mencionar los emisores no

luminosos (que emiten infrarrojos distales) y las lámparas o emisores luminosos (infrarrojos proximales) (Sendra & Martínez, 2008).

2.4 Firma espectral

También conocida como curva de reflectividad espectral, curva de respuesta espectral o signatura espectral, es una gráfica que permite relacionar la reflectividad espectral, la cual se refiere a la cantidad de energía incidente que es reflejada por un cuerpo, frente a la longitud de onda (véase Figura 5). Es usada para la extracción de las características espectrales de un objeto y permite conocer el rango del espectro electromagnético en el cual los datos se deben obtener para desarrollar determinada aplicación (Arbelo, 2015).

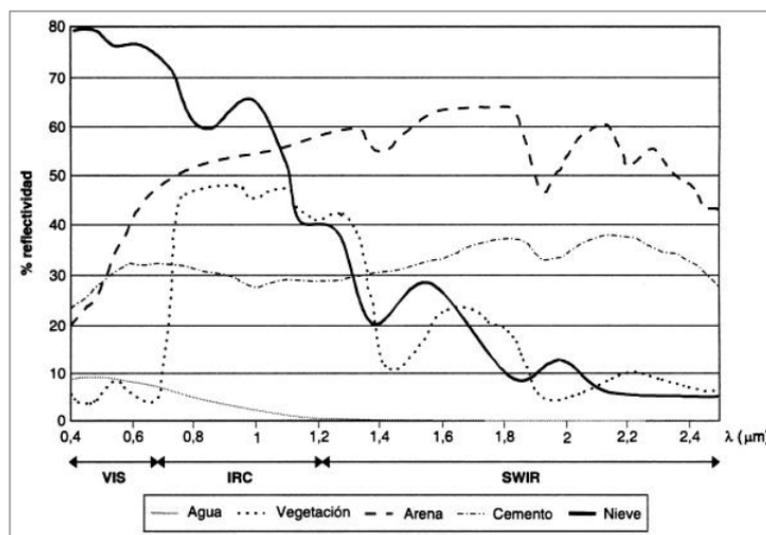


Figura 5. Firmas espectrales típicas para distintas coberturas

Fuente: (Chuvieco, 2008)

2.4.1 Firmas espectrales y reflectancia en la vegetación

La Figura 6 representa a una firma espectral típica de vegetación. Arbelo (2015) explica que los valles que se observan en la región del visible son las secciones

en donde se hallan los pigmentos de las hojas de las plantas. En el caso de la clorofila, ésta absorbe energía en las bandas ubicadas entre 0.45 y 0.67 μm , es por esto que el ojo humano percibe la vegetación sana de color verde, pues existe una gran absorción en el rojo y el azul, y alta reflexión en el verde (véase Figura 7). Sin embargo, cuando la vegetación está enferma, la clorofila se ve disminuida, lo cual provoca generalmente un incremento en la reflectividad en el rojo, dando como resultado un tono amarillento en las hojas (combinación de rojo y verde). En cuanto al rango abarcado por el infrarrojo cercano, la reflectividad de la vegetación sana tiene un aumento drástico (0.7 a 1.3 μm), el cual se debe a la estructura interna de las hojas; por lo tanto, el uso del infrarrojo facilita la separación de superficies de vegetación de las superficies sin vegetación, que son generalmente muy oscuras en este rango; además, permite la diferenciación entre especies de plantas, escasez de humedad, vigor, madurez natural y detección de estrés en la vegetación por enfermedad o ataques de insectos. Dentro del infrarrojo medio (más allá de 1.3 μm), se observa que la reflectividad de las hojas es inversamente proporcional al contenido de agua presente en las hojas (Gómez, 2004).

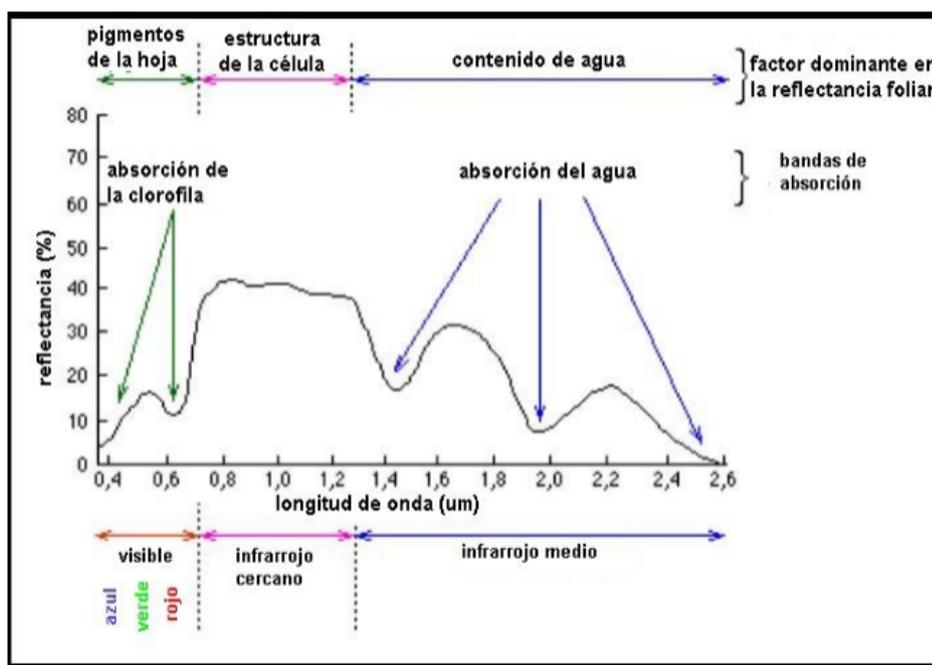
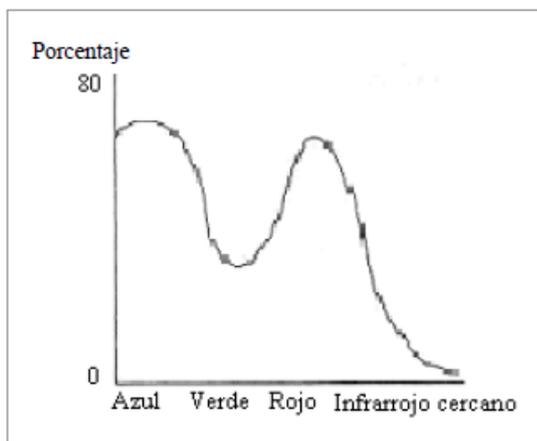


Figura 6. Firma espectral típica de vegetación y su comportamiento

Fuente: (Karszenbaum & Barraza, 2000)



**Figura 7. Espectro de absorción
para la clorofila**

Fuente: (Gómez M. , 2004)

2.4.2 Firmas espectrales y reflectancia en el suelo

Dentro de los principales factores que afectan el comportamiento espectral de los suelos son el color y el contenido de humedad (European Space Agency [ESA], 2014). Hernández & Montaner (2009) mencionan que cuando los suelos se encuentran secos, las tierras ennegrecidas presentan mayor reflectancia; mientras que cuando se encuentran con un alto contenido de agua poseen una reflectancia en promedio dos veces más débil que los suelos secos, registrando las mayores diferencias en la zona de infrarrojo cercano. Otros de los factores que modifican la reflectancia de los suelos son el contenido de minerales, materia orgánica, la textura y estructura, disposición vertical y horizontal, así como los ángulos de iluminación y observación de éstos (Hernández & Montaner, 2009). Un ejemplo de firmas de espectrales de diferentes clases de suelos se expone en la Figura 8.

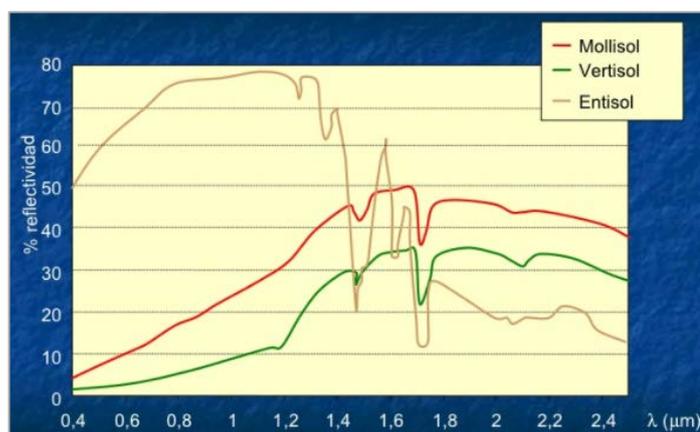


Figura 8: Comportamiento espectral de algunos tipos de suelo

Fuente: (Becerra, 2011)

2.5 Índices de vegetación

Son parámetros que se calculan a partir de valores de reflectividad a diferentes longitudes de onda, que tienen por objetivo extraer información relacionada con la vegetación, usualmente medidas de biomasa o vigor vegetal, tratando de minimizar la influencia de otros factores externos como las propiedades ópticas del suelo, la irradiancia solar, entre otros (Sobrino, 2001; Gómez M. , 2004).

De acuerdo a Gómez M. (2004), existe una variedad de índices de vegetación que se han desarrollado con el propósito de monitorear la vegetación; que en su mayoría “están basados en las interacciones diferentes entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo” (p. 33).

A continuación, se describen algunos de ellos:

2.5.1 Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI)

Normalized Difference Vegetation Index – NDVI (por sus siglas en inglés), es un índice que relaciona la energía absorbida y emitida por la vegetación en base a la radiación de determinadas bandas del espectro electromagnético (Infrarrojo cercano-

NIR y Rojo-R), las cuales son captadas por sensores, dando como resultado valores de intensidad de verdor, pudiendo interpretarse como el estado de salud o vigor vegetativo que posee el follaje (Cúnsulo, Kurbán, & Papparelli, 2012; Meneses, 2012; Rodríguez & Bullock, 2013).

El NDVI es un índice no dimensional y que, al ser normalizado, toma valores entre -1 y +1. Meneses (2012) enuncia que si el resultado es menor a 0.1, se trata de cuerpos de agua o tierra desnuda; mientras que, si toma valores cercanos a 1, se interpreta que existe una mayor actividad fotosintética. La ecuación propuesta por Yates et. al (1984) para cálculo de este índice en base a las bandas de un sensor es:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

En donde *NIR* es la banda del Infrarrojo Cercano y *Red* la banda Roja del sensor. Por otro lado, Sims & Gamon (2002) describen la ecuación para el cálculo del NDVI a partir de la reflectancia como:

$$NDVI = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705}} \quad (2)$$

Donde *R* es la reflectancia y cada subíndice es la longitud de onda en nanómetros.

En la adecuada interpretación del NDVI, es necesario considerar los ciclos fenológicos de la vegetación en estudio y datos sobre su desarrollo anual, con el fin de diferenciar entre las oscilaciones naturales de la planta y los cambios en la distribución espacial causados por otros factores (Gómez M. , 2004).

2.5.2 Índice de Contenido de Clorofila (CCI)

Chlorophyll content index – CCI (por sus siglas en inglés), fue desarrollado por (Sims, y otros, 2006) con el objetivo de estimar la cantidad de clorofila que se encuentra en las hojas de forma individual. Se obtiene a partir de la altura de los dos

picos que se observan en la primera derivada de la reflectancia en la región comprendida entre 700 y 750 nm, estableciendo la siguiente ecuación:

$$CCI = \frac{D_{720}}{D_{700}} \quad (3)$$

Donde D es la reflectancia y cada subíndice es la longitud de onda en nanómetros.

El contenido de clorofila es una medida directa de salud y condición de la planta. La obtención de este índice se puede realizar a través de un análisis no destructivo; por ejemplo, mediante el uso del ceptómetro. A través de este equipo, se obtiene información valiosa de diagnóstico, que se puede aplicar a iniciativas de producción e investigación de cultivos, tales como: nutrientes y manejo de riego, control de plagas, evaluación del estrés ambiental y mejoramiento de cultivos (Apogee Instruments, 2016).

2.5.3 Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI (por sus siglas en inglés) es un índice que se utiliza con el fin de corregir algunos efectos externos al valor del NDVI en lugares donde el aporte de la reflectividad del suelo es elevado (Huete, 1988). Por esta razón, al índice NDVI se le incluye el factor L , que varía según la densidad de la vegetación y que está relacionado con la reflectividad del suelo (Gonzaga, 2014).

Para calcular el valor de SAVI, se utiliza la siguiente ecuación propuesta por Huete (1988):

$$SAVI = \frac{IR - R}{IR + R + L} (1 + L) \quad (4)$$

Donde IR es la banda del infrarrojo cercano, R es la banda del rojo y L es el factor “línea del suelo”.

L puede tomar valores entre 0 y 1, dependiendo de la densidad de la vegetación (valores más altos para densidades más bajas; 0.5 si se trata de densidades

intermedias). Con el objetivo de mantener el mismo rango de variación que el NDVI, la ecuación de SAVI contiene el factor $(1 + L)$, con que se garantiza también la normalización del índice (Sánchez, y otros, 2000).

2.5.4 Índice de Área Foliar (LAI)

El Índice de Área Foliar (IAF, por sus siglas en inglés), es una cantidad adimensional (m^2/m^2) que se obtiene del cociente del área de las hojas de un cultivo y el área de suelo que la planta ocupa (INTAGRI, 2010).

Según Waters et. al (2002), el Índice de Área Foliar es un indicador de biomasa, resistencia vegetal y permite estimar la capacidad fotosintética de las plantas. Además, es una herramienta útil que permite estimar de manera precisa la capacidad que tiene un dosel vegetal para capturar luz, evaluar el crecimiento y desarrollo de los cultivos, desarrollar modelos predictores de cosecha y determinar el daño producido en el follaje de las plantas por las plagas y enfermedades. La medición del área foliar es un parámetro importante en la determinación de etapas fenológicas, estimación del potencial agronómico y biológico, cálculo del uso eficiente de la radiación solar y agua en los cultivos (INTAGRI, 2010; Sonnentag et al., 2008 citado por Mendoza et al., 2014).

Los valores de LAI se calculan a partir de las lecturas de PAR, medida por encima (PARa) y por debajo (PARd) del dosel, como se muestra en la Ecuación (5) (De la Casa et al., 2007):

$$IAF = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K} \right) fb - 1 \right] \ln \left(\frac{PAR_d}{PAR_a} \right)}{A(1 - 0.47 fb)} \quad (5)$$

Donde K es el coeficiente de extinción lumínico, fb es la fracción de la radiación directa con respecto a la radiación recibida y A es el coeficiente de absorción general del dosel.

2.5.5 Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR)

Se define a la radiación fotosintéticamente activa o PAR (Photosynthetically Active Radiation) como la región del espectro, cuya longitud de onda está comprendida en el rango de 400 a 700 nanómetros, el cual representa la porción del espectro que las plantas usan para la realización de la fotosíntesis (Reghini & Grossi, 2005; Decagon Devices Inc., 2017). Este rango es utilizado, ya que, para realizar la fotosíntesis, las plantas dependen de la absorción de la luz a través de unas moléculas llamadas pigmentos (clorofila a, clorofila b y β caroteno), que absorben y reflejan de distinta manera la luz como se puede ver en la Figura 9; sin embargo, todos estos pigmentos tienen su máxima absorción en el rango espectral mencionado con anterioridad (Khanacademy, 2017).

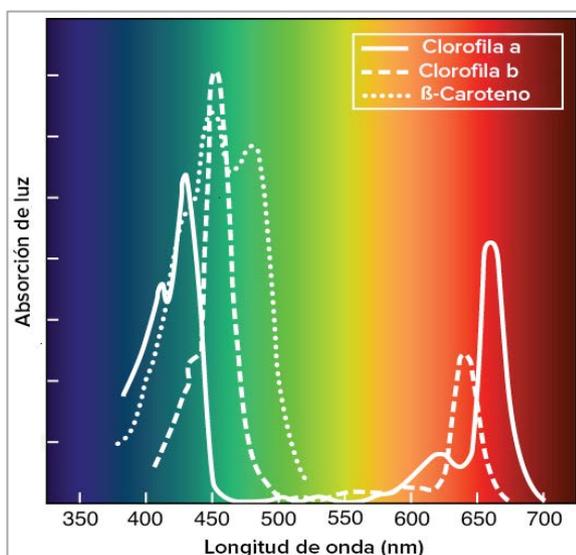


Figura 9: Espectro de absorción de tres pigmentos: Clorofila a, Clorofila b y β caroteno

Fuente: (Khanacademy, 2017)

Los datos de PAR pueden ser usados para determinar importantes parámetros de la estructura del dosel de la planta o para el cálculo del Índice de Área Foliar (LAI) (véase Ecuación 5). Además, la evaluación temporal de PAR es importante para estudiar el balance energético o el crecimiento de un cultivo en particular (Reghini & Grossi, 2005; Grossi, 2004).

Bajo el dosel de una planta, los niveles de radiación pueden variar de niveles altos a casi cero en un espacio de pocos centímetros, por lo que para obtener un resultado confiable de PAR es necesario la adquisición de varias muestras bajo el dosel (Decagon Devices Inc., 2017).

2.6 Fotogrametría

La fotogrametría es una disciplina que, a través de fotografías en dos dimensiones, crea modelos en 3D, con el fin de obtener características geométricas de los objetos que se representan en estas fotografías, mediante el uso de geometría proyectiva (relaciones matemáticas) y la visión estereoscópica del ser humano. Debido a que las mediciones no se efectúan sobre los objetos, sino sobre imágenes del mismo, se la considera como una técnica de medición indirecta (Jauregui, 2010).

Según la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (1980), citado por Lerma (2002), la fotogrametría se define como “el arte, ciencia y tecnología de obtener información fiel acerca de objetos físicos y su entorno a través de procesos de grabación, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos”.

Otra definición es la establecida por Buill et al (2003), quienes mencionan que la fotogrametría es “el conjunto de técnicas, instrumentales y matemáticas, que permiten obtener coordenadas tridimensionales de un objeto, a partir de la información bidimensional extraída de una o varias fotografías”.

2.6.1 Clasificación

Según la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) (2011), la fotogrametría se clasifica tomando en cuenta dos criterios: según el tipo de fotografía utilizada, y de acuerdo al método empleado, tal como se observa en la Figura 10.

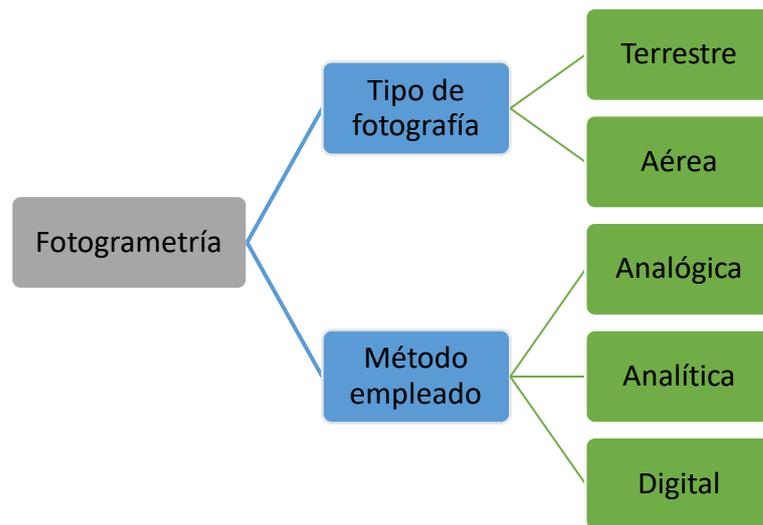


Figura 10: Clasificación de la fotogrametría

Fuente: Recopilado y modificado de UNNE (2011)

Esta clasificación se define, según Jauregui (2010), UNNE (2011) y Otero et. al (2010), de la siguiente manera:

- **Fotogrametría terrestre:** Se apoya en fotografías tomadas sobre un soporte terrestre, lo que hace que la posición y los elementos de orientación externa de la cámara sean conocidos. Sus principales aplicaciones son la arquitectura, arqueología, ingeniería estructural y levantamientos topográficos de terrenos escarpados.
- **Fotogrametría aérea:** Utiliza imágenes tomadas desde una cámara aerotransportada, lo que hace que su eje óptico casi siempre este vertical y que su posición en el espacio no esté determinada.
- **Fotogrametría analógica:** Se basa en la utilización de fotografías aéreas (formando modelos estereoscópicos), reconstruyendo el modelo espacial mediante la utilización de aparatos de restitución ópticos o mecánicos.
- **Fotogrametría analítica:** Proceso en el cual el modelo espacial se reconstruye mediante programas informáticos que simulan la geometría del terreno, agilizando los tiempos y logrando niveles de detalle a diferentes escalas.
- **Fotogrametría digital:** Se caracteriza por usar como dato de entrada fotografías en formato digital. El uso de las computadoras y programas afines ayudan a la reconstrucción del modelo de forma digital.

2.6.2 Imagen digital

Una imagen digital viene dada por la función $F(x,y)$, en donde x e y corresponden a las coordenadas de cada celda denominada pixel (picture element), mismas que tienen atribuidas cierto valor, denominado *Nivel Digital* (Nd), como lo ilustra la Figura 11. Cada una de estas celdas pueden ser unidimensionales o multidimensionales (superposición de celdas unidimensionales) (Sánchez J. , 2006).

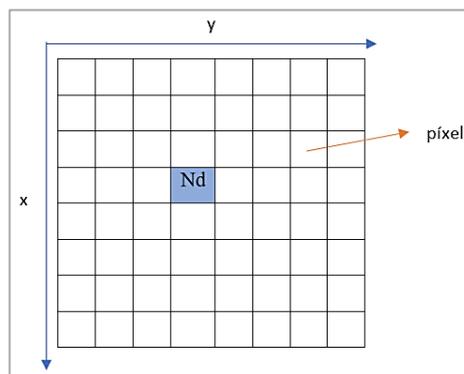


Figura 11: Imagen digital

Fuente: Modificado de Lerma (2002)

2.6.3 Técnicas de orientación

- **Orientación interna:** Proceso fotogramétrico que permite reproducir el haz perspectivo de rayos de una imagen, definidos por los puntos imagen y el centro de proyección; para lo cual es necesario conocer la información de la cámara utilizada al momento de la toma, como son: distancia focal, coordenadas de las marcas fiduciales y parámetros distorsión. Es decir, la orientación interior consiste el cambio de coordenadas de pixel a coordenadas de la fotografía (véase Figura 12), las cuales están referidas a un sistema de ejes coordenados cuyo origen está en el centro de proyección, el cual es obtenido a través de las marcas fiduciales (Otero, Ezquerro, Rodríguez, Martín, & Bachiller, 2010; UNNE, 2011).

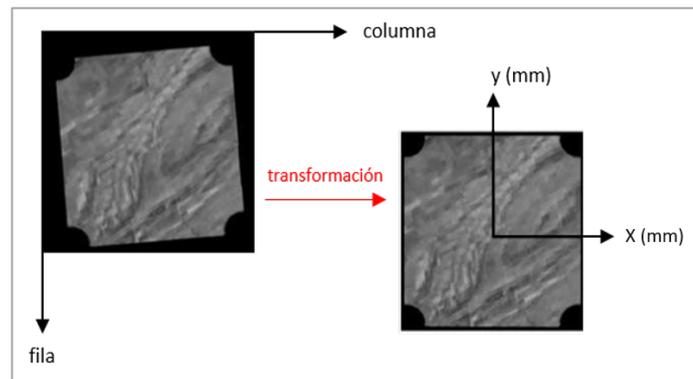


Figura 12: Sistema de píxel y fotográfico (métrico)

Fuente: Modificado de Coelho & Brito (2007)

- Orientación externa:** La orientación externa sirve principalmente para obtener la posición y altitud del sensor (cámara) al momento de recoger cada imagen fotográfica en relación con el espacio objeto de referencia, como se muestra en la Figura 13. En otras palabras, se trata de relacionar el sistema de coordenadas de la imagen, con el sistema de coordenadas del terreno. En el proceso fotogramétrico digital, se podría considerar a una imagen orientada exteriormente cuando se conocen los seis parámetros de orientación en cada una de las imágenes de vuelo: coordenadas espacio objeto para centro de perspectiva (X_0 , Y_0 , Z_0) y los ángulos de rotación de la cámara: omega (ω), phi (ϕ) y kappa (κ) (véase Figura 14) (Coelho & Nunes, 2007; Buill, Núñez, & Rodríguez, 2003).

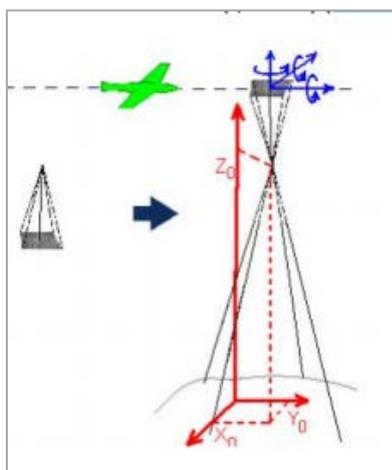


Figura 13: Orientación exterior

Fuente: Angulo (2014)

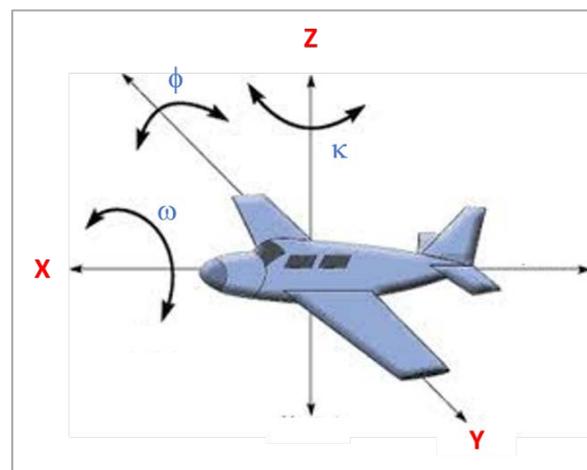


Figura 14: Parámetros de orientación

Fuente: Modificado de Macagnone (2017)

2.6.4 Aerotriangulación

Lerma (2002) menciona que la aerotriangulación hace referencia al “proceso de determinar indirectamente los parámetros (o elementos) de orientación de un bloque de imágenes fotográficas, así como las coordenadas terreno/objeto de ciertas entidades/puntos espaciales”.

También se define a la aerotriangulación como el conjunto de procesos llevados a cabo dentro de un bloque fotogramétrico con el fin de reducir el número de puntos de apoyo; es decir, nos permite limitar al máximo los requerimientos de apoyo en campo, y de esta manera, reducir en gran medida gastos topográficos a causa del proceso de orientación del conjunto de imágenes. Esto se afirma aún más, al incorporar tecnología GPS/INS aerotransportada con la capacidad de encontrar directamente los parámetros de orientación externa de la cámara en el momento que se captura la información (Sánchez J. , 2006; Lerma , 2002).

2.6.5 Ortofoto

Una ortofoto, es una fotografía aérea corregida geométricamente, en la cual, las imágenes de los objetos se encuentran en su verdadera posición planimétrica. Esto se lleva a cabo mediante el proceso de rectificación diferencial, el cual consiste en la eliminación de los efectos de inclinación y el desplazamiento de relieve presentes en las fotografías (GRAFCAN, 2015; Jauregui, 2010).

2.7 Equipos

2.7.1 Espectroradiómetro FieldSpec Hi Res 4

El espectroradiómetro es un instrumento que mide la radiación de luz entrante, la reflectancia y la transmitancia en un determinado rango del espectro electromagnético; es decir, permite cuantificar la intensidad de luz en diferentes longitudes de onda del espectro. Entre las principales aplicaciones de los

espectroradiómetros, se encuentra la generación de firmas espectrales de un tipo de cobertura u objeto, para luego estructurar una biblioteca espectral (Agua Andes, 2015).

Algunas de las principales características del espectroradiómetro FieldSpec Hi Res 4 se pueden apreciar en la Tabla 5.

Tabla 5.

Características del Espectroradiómetro FieldSpec Hi Res 4

Especificaciones	Valor/Unidades
Rango espectral	350-2500 nm
Detectores	VNIR (350-1000 nm) SWIR 1 (1001-1800 nm) SWIR 2 (1801-2500 nm)
Ancho espectral	VNIR: 1.4 nm SWIR: 1.1 nm
Resolución espectral	VNIR: 3nm SWIR: 8 nm
Tiempo de escaneado	100 milisegundos
Precisión de longitud de onda	0.5 nm
Input (Entrada)	Fibra óptica de 1,5 m (campo de visión de 1° y 25°).
Peso	5.44 kg (12 lb)
Computador	Windows® 7 64-bits laptop (controlador del equipo)

Fuente: (ASD Inc., 2017)

En la Figura 15 se ilustra una fotografía del equipo.



**Figura 15: Espectroradiómetro
FieldSpec Hi Res 4**

Fuente: (ASD Inc., 2017)

2.7.2 Ceptómetro AccuPAR LP-80

El ceptómetro es un instrumento de referencia compuesto por un conjunto lineal de sensores de radiación fotosintéticamente activa (PAR), utilizados para realizar medidas no destructivas de índice de área foliar (LAI) (Decagon Devices Inc., 2015).

Algunas de las principales características del ceptómetro AccuPAR LP-80 se aprecian en la Tabla 6.

Tabla 6.

Especificaciones del Ceptómetro AccuPAR LP-80

Especificaciones	Valor/Unidades
Capacidad de almacenamiento	1 MB RAM (más de 2.000 mediciones)
Número de sensores	80
Alcance de PAR	0 to > 2,500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Resolución	1 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Longitud de la sonda	84 cm
Longitud total	99 cm
Peso	0.56 kg
Longitud del cable de sensor PAR externo	5 m
Energía	4AA pilas alcalinas
Resolución espacial mínima	1 cm

Fuente: (Decagon Devices Inc., 2015)

En la Figura 15 se ilustra una fotografía del equipo.

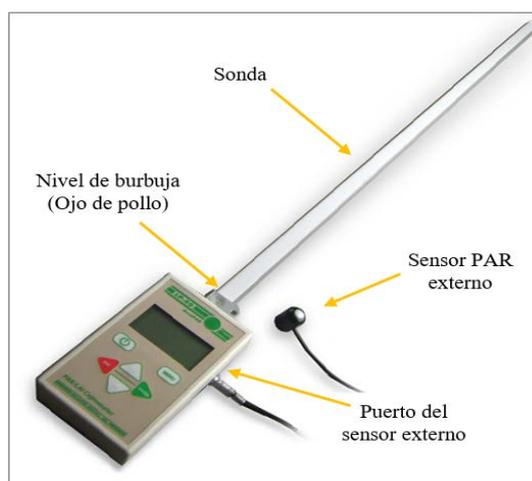


Figura 16: Ceptómetro AccuPAR LP-80

Fuente: Modificado de Decagon Devices Inc., 2015

2.7.3 Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV)

Los UAV (Unmanned Aerial Vehicle), son aeronaves capaces de volar sin piloto a bordo, pero controladas desde tierra. Están diseñados para cumplir diferentes tipos de misiones, que cubren campos desde la seguridad y defensa a los de agricultura o medio ambiente (Barrientos, y otros, 2007).

- **Clasificación**

Existen diferentes clasificaciones de los UAVs, que se detallan a continuación:

a. *Según el tipo de Aeronave:*

Según Barrientos et. al (2007) los UAVs se dividen en aeronaves de *despegue vertical* y de *despegue no vertical*, tal como se muestra en la Figura 17. Los primeros, se dividen en los de Ala rotativa (Helicópteros y Quad-rotors) y Auto-sustentados (Dirigibles, Globos aerostáticos). Los segundos, se dividen en Ala flexible (Parapente y Ala delta) y Ala fija (Aeroplanos).

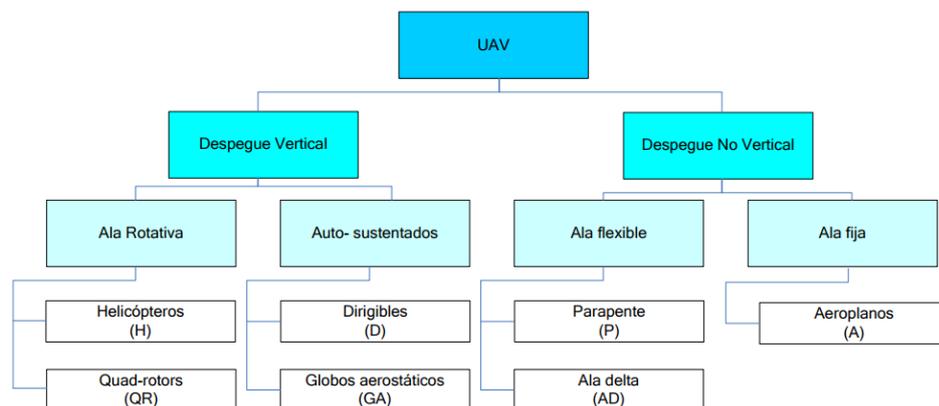


Figura 17: Clasificación de los UAVs según el tipo de Aeronave

Fuente: (Barrientos, y otros, 2007)

Para Gallardo (2007), los UAVs se clasifican de la siguiente manera (véase Figura 18):

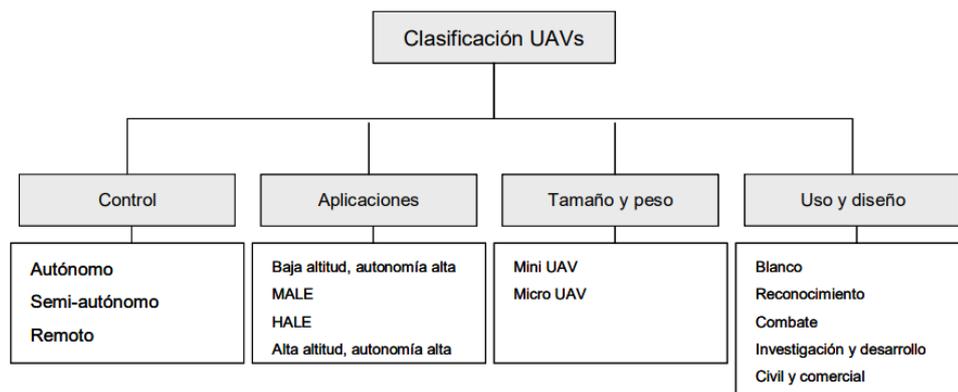


Figura 18: Clasificación de los UAVs

Fuente: (Gallardo, 2007)

b. Según el tipo de control:

Dentro de esta categoría, los UAVs se clasifican en:

- *Autónomos*: realizan un monitoreo desde tierra y se espera que realicen su misión dentro de un ámbito programado.
- *Semiautónomos*: modo en donde el piloto, a través de una interfaz de administración del vuelo, realiza cambios y conduce la misión.
- *Remotos*: el control del vehículo en su totalidad se realiza remotamente.

c. Según altitud y autonomía:

- Baja altitud, autonomía alta.
- Altitud media, autonomía alta.
- Alta altitud, autonomía alta.
- Alta altitud, autonomía alta.

d. Según el tamaño y peso:

- Mini UAV: tienen un peso entre 1-20 kg.
- Micro UAV: son aquellos con un peso inferior a 1 kg.

e. Según el uso y diseño:

- Blanco: es aquel que simula el misil de un enemigo o un avión.
- Reconocimiento: es aquel que abastece de información de inteligencia en el campo de batalla.
- Combate: brinda capacidad de ataque en misiones de alto riesgo.
- Investigación y desarrollo: sirven para el desarrollo de la tecnología.
- Civil y comercial: destinadas a realizar aplicaciones civiles y ser comercializados

• Aplicaciones

En la Figura 19, se puede observar algunas de las aplicaciones de los UAVs, las cuales según Cox et. al (2004), citado por Ángulo (2014), se dividen en cuatro grupos: gestión del territorio, comercial, seguridad nacional y ciencias de la tierra.

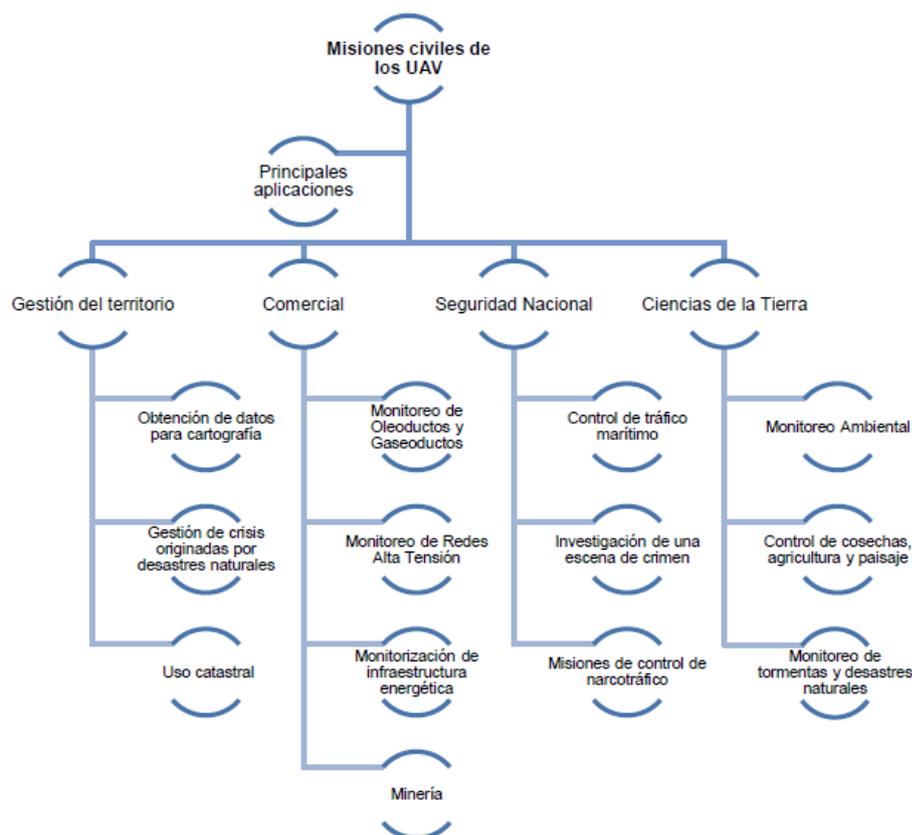


Figura 19: Principales aplicaciones de los UAVs

Fuente: (Angulo, 2014)

2.7.3.1 UAV DJI Matrice 100

En el presente estudio se utilizará el UAV DJI Matrice 100 (véase Figura 20).



Figura 20: DJI Matrice 100

Fuente: (DJI, 2017b)

En la Tabla 7, se observan las especificaciones técnicas de este UAV.

Tabla 7.

Especificaciones del UAV DJI Matrice 100

Especificaciones	Valor/Unidades
Número de rotores	4
Dimensiones	650 mm de envergadura
Peso	2.355 g
Tiempo de vuelo máximo	40 min
Capacidad de carga útil	1.000 g
Máximo peso al despegar	3.600 g
Velocidad angular máxima	Elevación: 300 ^o /s, Dirección: 150 ^o /s
Ángulo de inclinación máximo	35 ^o
Velocidad máxima de ascenso	5 m/s
Velocidad máxima de descenso	4 m/s
Máxima resistencia al viento	10 m/s
Velocidad máxima	22 m/s: modo ATTI, sin carga útil, sin viento 17 m/s: modo GPS, sin carga útil, sin viento
Batería	4.500 mAh 6s de polímero de litio
Temperatura de operación	-10°C a 40°C
Control remoto	Sistema de control: Emisora de radio control + Teléfono/Tablet Rango de operación: 5.000 m Sensibilidad del receptor: 20 dBm Frecuencia de operación: 5.725 ~ 5.825 GHz

Fuente: (DJI, 2017a)

El UAV utiliza siguientes cámaras:

2.7.3.2 Cámara Zenmuse X3

La Figura 21 muestra una fotografía de la cámara Zenmuse X3.



Figura 21: Cámara Zenmuse X3

Fuente: (DJI, 2017c)

Algunas de las especificaciones técnicas de esta cámara se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Especificaciones de la cámara Zenmuse X3

Especificaciones	Valor/Unidades
Tamaño	6.17 x 4.55 mm
Tipo	CMOS
Píxeles efectivos	12.4
Píxeles máximos	12.4
Rango ISO	100 ~ 3200
Disparo en ráfaga	Píxeles completos (7fps)
Velocidad de obturación	8~1/8000 seg
Lentes	Óptica (focal): 20 mm
	Iris: F/2.8
	FOV diagonal: 45°
	Distorsión: 0.90%
Video	Rango de enfoque: infinito
	Resolución: 4096x2160; 3840x2160; 1920x1080; 1280x720
	Formato: MP4/MOV
	Almacenamiento: Micro SD Clase 10

Fuente: (DJI, 2017c)

2.7.3.3 Cámara Parrot Sequoia

De acuerdo con ACG Drone (2016), la cámara multispectral Parrot Sequoia es ideal para usos relacionados con agricultura de precisión; ya que, gracias a sus 4 sensores con bandas distintas: Verde, Rojo, Borde rojo e Infrarrojo cercano, es capaz de evaluar el crecimiento y salud de un cultivo; conocer si está siendo afectado por plagas, verificar si existe exceso o falta de riego, entre otras opciones.

El sistema se encuentra compuesto por dos elementos, por un lado, la cámara multispectral (véase Figura 22), y por otra parte, dispone de un sensor solar (véase Figura 23), el cual durante el vuelo, mide forma continua las condiciones de luz en las mismas bandas del espectro que el sensor multispectral, obteniéndose de esta manera una calibración automática de dichas bandas, independientemente de las condiciones de luz (véase Figura 24). Dichos elementos se encuentran dispuestos en el UAV como lo muestra la Figura 25 (ACG Drone, 2016).



Figura 22: Cámara multispectral Sequoia

Fuente: (Corrigan, 2017)

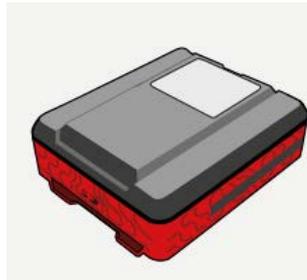
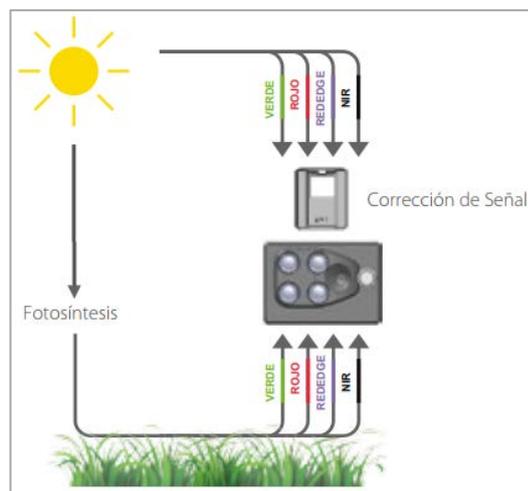


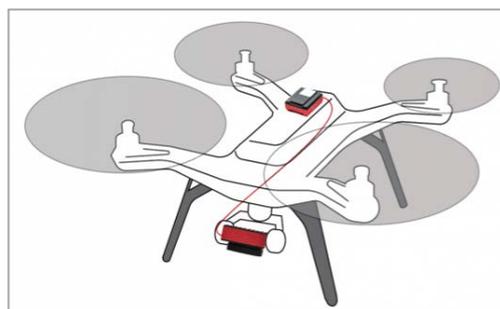
Figura 23: Sensor solar

Fuente: (UAV SenseFly, 2017)



**Figura 24: Corrección de imágenes
por medio de sensor de luz**

Fuente: (UAV SenseFly, 2017)



**Figura 25: Disposición de la
cámara multiespectral y el sensor
solar sobre un UAV**

Fuente: (ACG Drone, 2016)

En la Tabla 9 mostrada a continuación, se encuentran las especificaciones de la cámara multispectral Parrot Sequoia.

Tabla 9.

Especificaciones de la cámara multispectral Parrot Sequoia

Especificaciones	Valor/Unidades
Dimensiones y características	Medidas: 59 mm x 41 mm x 28 mm Peso: 72 g Almacenamiento incorporado 64 GB IMU y magnetómetro
Sensor RGB	16 Megapíxeles Definición: 4608 x 3456 píxeles HFOV: 63.9° VFOV: 50.1° DFOV:73.5°
4 sensores con bandas distintas	Bandas: Verde (550 BP 40), Rojo (660 BP 40), Borde rojo (735 BP 10), Infrarrojo cercano (790 BP 40) 1.2 Megapíxeles Definición: 1280 x 960 píxeles HFOV: 61.9° VFOV: 48.5° DFOV:73.7°
Sensor solar	Medidas: 47mm x 39,6 mm x 18,5 mm Peso: 35 g Ranura para tarjeta SD IMU y magnetómetro GPS
	4 sensores espectrales (los mismos filtros que el cuerpo)

Fuente: (Parrot, 2017)

2.7.4 GNSS/GPS Trimble R8

El GNSS/GPS es un equipo que recepta las señales de posición y reloj de al menos tres satélites de la red del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), con las que el aparato calcula su posición mediante triangulación (Topoequipos S.A., 2017).

Las características del equipo GNSS/GPS Trimble R8 se encuentran descritas en la Tabla 10 y una fotografía de él se aprecia en la Figura 26.

Tabla 10.***Especificaciones del GPS de precisión Trimble R8***

Especificaciones	Valor/Unidades
Señales de satélite de rastreo	GPS: L1C/A, L1C, L2C, L2E, L5 GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3 SBAS: L1C/A, L5 Galileo: E1, E5A, E5B COMPASS: B1, B2
Precisión horizontal (postproceso)	8 mm + 1 ppm RMS
Precisión vertical (postproceso)	15 mm + 1 ppm RMS

Fuente: (Trimble, 2017)



**Figura 26: GNSS/GPS
Trimble R8**

Fuente: (Geotronics, 2012)

2.8 Diseño Experimental

Se trata de un esquema de cómo realizar un experimento. Tiene por objetivo fundamental, el determinar la existencia de diferencias significativas entre los diferentes tratamientos del experimento y en caso de que así sea, cuál sería la magnitud de esta diferencia (Badii et. al, 2007). Algunos conceptos necesarios en la comprensión de los diseños experimentales se mencionan a continuación (Badii et. al, 2007; URU, 2017; Argüelles & Carvajal, 2013):

- **Experimento.-** Procedimiento basado en el control de las condiciones, con el cual es posible la verificación de hipótesis.
- **Unidad Experimental (UE).-** Es la unidad básica o elemental que se emplea dentro de un experimento. Puede ser la parcela de un cultivo (pequeña porción de terreno), un animal, una caja Petri, un tubo de ensayo, entre otros.
- **Tratamiento.-** Se refiere a los procedimientos o estímulos cuyo efecto se desea medir o comparar entre sí; por ejemplo: dosis de fertilización, variedades de una especie vegetal, razas de ganado vacuno, niveles de riego, etc.
- **Repetición (Bloque).-** Es el número de veces que un tratamiento determinado aparece en el experimento.
- **Aleatorización.-** Asignación al azar de tratamientos a cada una de las unidades experimentales, es decir, sin la intervención de la voluntad del investigador.

Algunos de los tipos de estructura de un diseño experimental, según Rueda (2017) son:

- **Diseño de Bloques al azar:** Supone que todas las UE son homogéneas y los tratamientos se aplican al azar sobre dichas unidades.
- **Diseño de Bloques Completos al azar:** Este diseño consiste en b bloques con k tratamientos asignados aleatoriamente para cada UE en cada bloque.
- **Diseño de Cuadro Latino:** Consiste en un diseño de bloques en dos direcciones. Los tratamientos se arreglan en un cuadrado $k \times k$, donde los renglones se llaman bloques renglón y las columnas, bloques columnas. Los tratamientos se aplican aleatoriamente sobre las UE de tal manera que no se repitan en los renglones ni en las columnas.
- **Diseño de Bloques Incompletos:** Se utiliza cuando el número de tratamientos es mayor que el número de UE en cada bloque.
- **Combinaciones y generalizaciones:** El tamaño de los bloques varía de bloque a bloque; éstos podrían estar completos o no.

2.8.1 *Diseño de Bloques Completos al Azar (DCBA)*

El DCBA es el diseño más utilizado en la experimentación agrícola y se caracteriza principalmente porque los tratamientos aparecen solo una vez en cada

repetición; requiere que los tratamientos se asignen de manera aleatoria a las unidades experimentales independientemente en cada bloque. Los bloques pueden estar conformados por áreas compactas de un campo, grupos de animales que pueden manipularse de manera uniforme, diferentes tiempos de aplicación de tratamientos a unidades experimentales, entre otros. Los bloques se conforman agrupando las unidades experimentales, de tal manera que la variación dentro de bloques sea mínima y entre bloques sea máxima (Argüelles & Carvajal, 2013).

2.8.1.1 Análisis de Varianza (ADEVA) para DBCA

Dicovski (2010) menciona que es una de las técnicas más utilizadas en los análisis de datos de los diseños experimentales, empleada cuando se requiere contrastar más de dos medias; por lo que, puede verse como una extensión de la prueba t para diferencia de dos medias. Consiste básicamente en un procedimiento que permite dividir la varianza de la variable dependiente, generalmente continua, en dos o más componentes, cada uno de los cuales puede ser atribuido a una fuente (variable o factor) identificable y la otra al error experimental (Dicovski, 2010). Las variables independientes generalmente son nominales y corresponden a los factores en estudio.

El modelo estadístico de este análisis específicamente para DCBA se describe a continuación (Dicovski, 2010):

$$x_{ij} = \bar{x} \pm \alpha_i \pm \beta_j \pm \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

Donde x_{ij} es el valor de la j observación ubicada en el i tratamiento; \bar{x} es el promedio general; α_i es el efecto del tratamiento i ; β_j es el efecto del bloque j ; y ε_{ij} es la variación o error de las observaciones ubicada en el bloque j , utilizando el tratamiento i .

El modelo supone que no existe interacción entre los bloques y que los efectos son fijos sin importar los tratamientos; esto quiere decir, que un tratamiento dado no puede ser el mejor promedio en un bloque y ser el peor en otro. Al realizar el experimento lo que se espera es que haya diferencias significativas entre los bloques

y que éstos absorban error experimental. Sin embargo, esta prueba solo es referencial (Dicovski, 2010).

Sánchez (2006) describe los componentes del ADEVA para DCBA en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Factor de corrección (FC)} = \frac{(\sum X_{ij})^2}{n} \quad (7)$$

$$\text{Suma de Cuadrados Totales (SCT)} = \sum ((X_{ij})^2) - FC \quad (8)$$

$$\text{Suma de Cuadrados de los Tratamientos (SCTrat)} = \frac{\sum y^2}{b} - FC \quad (9)$$

$$\text{Suma de Cuadrados de los Bloques (SCB)} = \frac{\sum Y_j^2}{t} - FC \quad (10)$$

$$\text{Suma de Cuadrados del Error (SCE)} = SCT - SCTrat - SCB \quad (11)$$

Junto a estos componentes, el esquema general del ADEVA se plantea como lo ilustra la Tabla 11.

Tabla 11.

Esquema general del ADEVA para DCBA

Fuentes de Variación (FV)	Grados de Libertad (gl)	Suma de Cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	F calculada	F tabulada
Total	n-1	SCT	-	-	
Tratamientos	t-1	SCTrat	SCT/gl Trat	CM Trat/CM Error	
Bloques	b-1	SCB	SCB/gl Bloques	CM Bloques/CM Error	
Error Experimental	gl total - gl tratam. - gl bloques	SCE	SCE/gl Error	-	

Fuente: (Sánchez Otero, 2006)

Donde n es el número de observaciones, t es el número de tratamientos y b es el número de bloques o repeticiones.

2.8.1.2 Prueba de separación de medias: Prueba de Tukey

Es una de las pruebas de diferencia significativa mínima (DSM) que permite comparar las medias obtenidas, con el fin de conocer en qué tratamientos existen diferencias o cuáles se comportan de la misma forma; por lo tanto, se realiza cuando el ANOVA muestra la existencia de diferencias significativas. También se le conoce como *Diferencia Significativa Honesta*; es más estricta y robusta en comparación con otras y se sugiere su utilización en caso de que se requiera separaciones muy confiables (Dicovski, 2010). El modelo matemático de esta prueba se describe a continuación:

$$DSM_{Tukey} = \rho_{\alpha, gl\ error, "t"} * \sqrt{\frac{CM_{error}}{r}} \quad (12)$$

Donde ρ es un valor tabulado que depende de la significancia estadística α , los grados de libertad del error y el valor t ; CM_{error} es el cuadrado medio del error y r son los tratamientos.

2.9 Agricultura

La agricultura constituye un conjunto de técnicas y conocimientos para cultivar la tierra, la cual engloba los distintos trabajos de tratamiento del suelo y cultivo de vegetales; en otras palabras, comprende todo un conjunto de acciones humanas que transforma el medio ambiente natural, con el fin de hacerlo más apto para el crecimiento de las siembras (Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural, 2013).

2.9.1 Agricultura de precisión (AP)

Corresponde al conjunto de tecnologías que tienen como objetivo la optimización de la producción agrícola mediante la estimación, evaluación, control y comprensión de la variabilidad espacial y temporal de los factores que intervienen en el desarrollo de un cultivo (Cenicña, 2015).

Según SerSol (2015), la agricultura de precisión contribuye en los siguientes aspectos:

- **Gestión Ambiental:** Ya que estas técnicas permiten conocer el lugar idóneo de colocación del fertilizante, el momento óptimo y la dosis exacta, el suelo y sus capas freáticas se ven beneficiadas, convirtiéndose así en las bases fundamentales de la agricultura sostenible.
- **Gestión Económica:** La cantidad de fertilizantes se ve reducida, lo que supone un rendimiento económico.
- **Gestión de la Tecnología en Agronomía:** La tecnología permite el ajuste de las prácticas de cultivo a las necesidades de cada planta; además, con la información obtenida se puede construir una memoria real del área, mejorar la cantidad de los productos agrícolas y ayudar en la toma de decisiones, entre otros.

Las técnicas utilizadas dentro de la agricultura de precisión de acuerdo a SerSol (2015) son: Sensores Remotos (RS), Sistemas de Navegación Global por Satélite (Global Navigation Satellite System o GNSS), imágenes aéreas o con UAV, y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

2.9.2 *Cultivo*

Es la práctica de obtener productos de la tierra a través del sembrado de semillas y una serie de actividades o labores (Fundación Helvetas Honduras, 2014). Se clasifican tomando en cuenta algunos factores, siendo el más destacable la estacionalidad o duración del cultivo (Servicios Agropecuarios de la Costa S.A., 2015):

- **Perenne:** También conocido como cultivo de ciclo largo, se caracteriza porque su ciclo vegetativo se extiende más allá de doce meses y se obtienen varias cosechas una vez establecida la plantación, generalmente. Ejemplos de estos cultivos son la naranja, el aguacate y el cacao.
- **Anuales o cíclicos:** Conocidos también como cultivos de ciclo corto, son aquellos que su período vegetativo tiene una duración menor a 12 meses y requieren de una

nueva siembra para la obtención de cosecha. Brindan la ventaja de sembrar y planificar la huerta, por lo que se puede cambiar de cultivo cuando se desee. El maíz, trigo y fréjol pertenecen a este tipo de cultivo.

- **Bienal:** En los que su desarrollo se extiende a dos años; es decir, su cosecha tarda dos ciclos. La papaya, la piña y la fresa, son algunos ejemplos.
- **Temporal:** Son cultivos dependientes del comportamiento de las lluvias y de la capacidad del suelo para captar el agua. Tienen la ventaja de que el gasto en la producción es menor al no tener que invertir en el tema de riego. Un ejemplo es el limón.

2.9.3 Manejo agronómico

Según el Ministerio para la Economía Popular – MINEP de Venezuela (2005), algunas de las actividades que comprenden el manejo agronómico, es decir, aquellas que se realizan durante el desarrollo del cultivo son las siguientes:

2.9.3.1 Labranza

Es el proceso que permite la preparación del suelo para la siembra, el cual comprende las acciones para mantenerlo libre de malezas y mejorar algunas de sus propiedades físicas. El tipo de labranza más utilizado es el *convencional*, que involucra la inversión del suelo, es decir, dar vuelta al suelo a través del uso de maquinarias de arado (véase Figura 27), donde las capas superficiales son enterradas y las capas más profundas llevadas a la superficie, consiguiendo además enterrar las malezas; otro objetivo de esta labranza, es el desmenuzar los terrones y emparejar el suelo para sembrar, lo que se logra mediante el uso de maquinaria de rastra (véase Figura 28) (MINEP, 2015).



Figura 27: Máquina de arado

Fuente: (Talleres Divassón, 2014)



Figura 28: Máquina para rastra

Fuente: (John Deere, 2017)

2.9.3.2 Siembra

Las actividades previas a este proceso son la *nivelación del terreno*, para evitar el estancamiento de aguas lluvia o de riego, y el *trazado del terreno* dependiendo del tipo de cultivo (necesario en plantaciones tropicales, de frutales y forestales), el cual consiste en la planificación de la ubicación de semillas de forma equidistante y uniforme. En sí, la siembra consiste en colocar la semilla en el suelo en condiciones que garantice su germinación y emergencia. Para ello, existen dos métodos, como lo muestra la Figura 29 (MINEP, 2015).

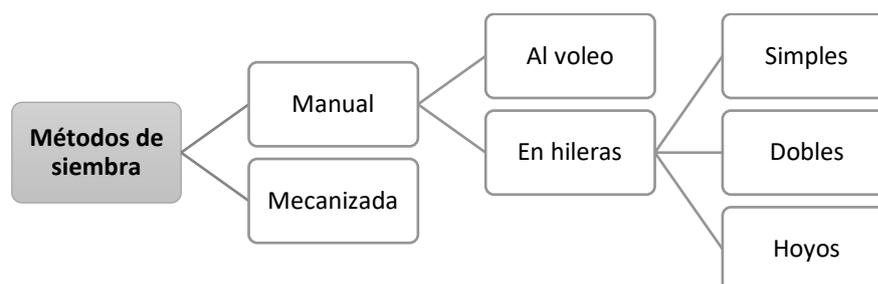


Figura 29: Métodos de siembra

Fuente: Recopilado y modificado de MINEP (2005)

La siembra al voleo es el método más rápido y consiste en el esparcimiento de semillas en forma de lluvia, de manera que pueda ser distribuida uniformemente en el suelo; luego éstas son incorporadas con la rastra; de tal manera que, las semillas queden en el interior del suelo. La siembra en hilera, conocida también como chorro continuo, es el método más utilizado y consiste en depositar las semillas a lo largo del hilo o surco de siembra, de tal forma que quede repartida a una distancia constante y a

una profundidad determinada. Mientras que la siembra en hoyos consiste en sembrar las plantas en sus primeros estados de desarrollo (plántulas) directamente en hoyos y es utilizada principalmente en frutales, ornamentales, cacao o café (MINEP, 2015).

2.9.3.3 Fertilización

Consiste en la aplicación de sustancias que contienen cantidades apreciables de nutrientes que son necesarias para el desarrollo de las plantas; y que, al ser agregadas al suelo, aumentan la fertilidad y, por consiguiente, la productividad (MINEP, 2015).

Básicamente, existen dos tipos de fertilizantes: los orgánicos, que son una composición de material natural entre estiércol de animal, restos vegetales, desperdicios domésticos o caseros; y los inorgánicos, también llamados fertilizantes minerales, que son productos químicos obtenidos por procesos industriales en laboratorio, por ejemplo: Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Azufre (S). Los fertilizantes pueden ser aplicados utilizando los mismos métodos de siembra: *al voleo, en hileras y en hoyos* (MINEP, 2015).

2.9.3.4 Riego

Consiste en la aplicación de agua al suelo, lo que garantizará la humedad necesaria para el buen desarrollo de las plantas. El suministro de agua a los cultivos puede ser de manera natural, a través de la lluvia; y artificialmente existen algunos métodos como (MINEP, 2015):

Riego superficial:

- **Por inundación:** Se lo utiliza en terrenos con poca pendiente, en donde se permite la entrada de una lámina de agua desde diques, dejándola en el cultivo por un período de tiempo. Cultivos como el arroz, pasto o caña de azúcar necesitan de este tipo de riego.
- **Por surcos:** En donde se riega por gravedad. Dichos surcos o acanaladuras permiten la distribución uniforme del agua sobre la superficie del suelo. Ejemplos: hortalizas, maíz, frutales.

Riego presurizado:

- **Por aspersores:** Mediante estas herramientas situadas a lo largo de una tubería, el agua se aplica en forma de lluvia: es esparcida en un círculo continuo hasta que la humedad llega a las raíces del cultivo.
- **Localizado:** El agua se suministra a intervalos frecuentes en pequeñas cantidades y la humedad solo llega a la raíz de cada planta por medio de delgados tubos de plástico.

2.9.3.5 Control de enfermedades y plagas

Las malezas son todas aquellas plantas consideradas como plagas porque compiten e interfieren con los cultivos y reducen los rendimientos y la calidad de la cosecha; limitando en la mayoría de los casos, la recolección y cosecha (MINEP, 2015).

En cuanto a las enfermedades que pueden afectar a los cultivos, se clasifican de acuerdo al agente causal o patógeno, como la muestra la Figura 30.

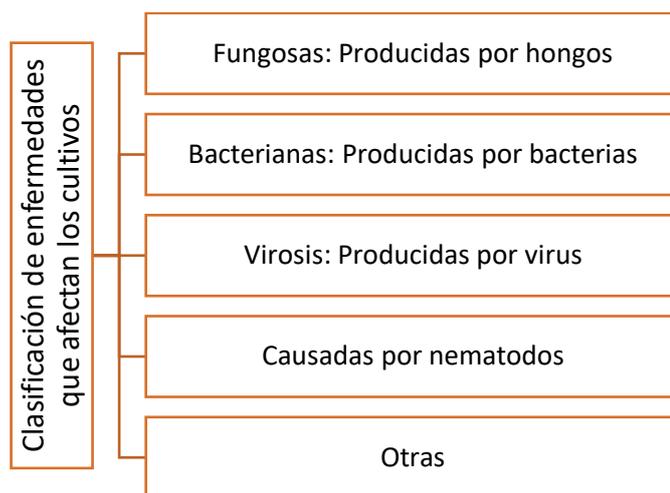


Figura 30: Clasificación de enfermedades que afectan los cultivos

Fuente: Recopilado y modificado de MINEP (2005)

Al igual que las malezas, estas enfermedades reducen el rendimiento, pueden causar la destrucción completa de las cosechas, afectan la calidad y durabilidad de los

productos, entre otras. Para controlar dichas enfermedades y plagas existen algunos métodos, que se describen brevemente a continuación (MINEP, 2015):

- **Legal:** Hace referencia al conjunto de normativas que previenen la introducción de plagas a lugares donde no están presentes; por ejemplo, las cuarentenas.
- **Cultural:** El cual establece prácticas de manejo favorables al cultivo; por ejemplo, adecuada preparación de suelos, rotación de cultivos, densidad de siembra adecuada.
- **Biológico:** Consiste en la introducción de enemigos naturales para controlar las poblaciones de plagas.
- **Genético:** Desarrollo de variedades nuevas e híbridos resistentes a plagas y enfermedades.
- **Físico:** Comprende el uso de variables o agentes físicos como manejo de la temperatura, humedad, fuego, instalación de mallas metálicas.
- **Mecánico:** Utilización de herramientas acopladas al tractor como rastrillos, arado, rastra, cultivadora.
- **Etológico:** Uso de sustancias químicas secretadas por seres vivos, como las feromonas, que provocan cambios de comportamiento; en este caso, de las plagas, impidiendo su desarrollo.
- **Autocida:** Implica la introducción de insectos-plaga estériles que suprimen a insectos de su misma especie que son dañinos.
- **Químico selectivo:** Comprende el uso de productos químicos que reducen las plagas: herbicidas, insecticidas, acaricidas, nematicidas, fungicidas, bactericidas.

2.9.3.6 Aporque

Consiste en arrumar suelo a la base o pie de la planta, brindándoles así una mejor estabilidad. Puede hacerse de forma manual o mecanizada (MINEP, 2015).

2.9.3.7 Cosecha

Según la FAO (2003), la cosecha es la culminación de la etapa del cultivo, que consiste en la separación de la planta de la porción vegetal de interés comercial, que pueden ser frutos, hojas, bulbos, tubérculos, pecíolos, inflorescencias, etc.; existen dos

sistemas de cosecha: manual, que es el más utilizado en frutas y hortalizas para consumo en fresco; y mecanizada, preferida en cultivos de grandes extensiones con fines industriales (MINEP, 2015).

2.9.4 Suelos

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2017a), el suelo es el “medio natural para el crecimiento de las plantas” (párr. 1); también lo define como un cuerpo natural que consiste en capas (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua.

En el Ecuador, se pueden encontrar algunos tipos de suelo, como se ilustra en la Figura 31.

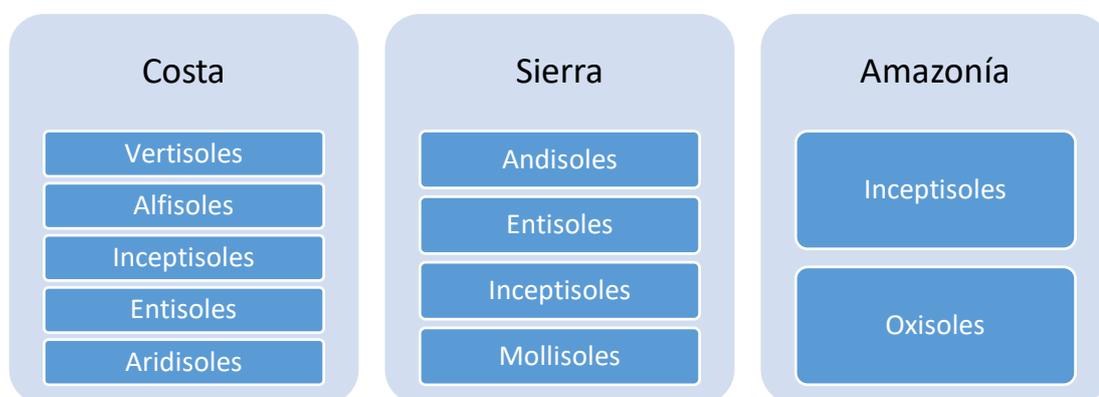


Figura 31: Tipos de suelo existentes en el Ecuador

Fuente: Recopilado y modificado de Calvache (2015)

La Organización de Estados Americanos (OEA, 1978) y Calvache (2015), describen estos suelos como:

- **Vertisoles:** Aquellos que poseen un alto contenido de arcilla (>35%), tienen abundantes grietas que se caracterizan por ser anchas y profundas.
- **Alfisoles:** Son suelos minerales con presencia de horizontes, con buen grado de desarrollo pedogenético (formación del suelo); tienen un horizonte superficial

claro y lavado sobre un horizonte con acumulación de arcilla; saturación de bases elevada.

- **Inceptisoles:** Se forman en diversos materiales de origen y en una amplia gama de pisos climáticos. Son suelos minerales con un desarrollo de horizontes pedogenéticos incipiente, pues presentan uno o más horizontes de alteración o concentración.
- **Entisoles:** Poseen poca o ninguna evidencia de desarrollo de horizontes pedogenéticos. Existe dominio de material mineral primario no consolidado y aportes fluviales. Son superficiales y son el resultado de erosiones, aportes aluviales y coluviales o por acción antrópica.
- **Aridisoles:** Son suelos minerales característicos de zonas áridas, con incipiente evidencia de desarrollo; por lo que, el estado de meteorización es bajo al igual que la cantidad de materia orgánica. Tienen colores generalmente claros y vegetación desértica.
- **Andisoles:** Se desarrollan a partir de cenizas volcánicas y evidencian poca a moderada evolución; presentan un apreciable contenido de arcillas amorfas; tienen una baja densidad aparente ($< 0,85$ g/cc) y alta fijación de fósforo.
- **Mollisoles:** Son suelos superficiales a moderadamente profundos, con epipedón mólico, desarrollados de materiales volcánicos y sedimentarios; tienen horizontes superficiales oscurecidos, estructurados en gránulos bien desarrollados de consistencia friable y dotados suficientemente de bases, principalmente Ca y Mg. Presentan topografía que varía entre ligeramente inclinada a extremadamente empinada.
- **Oxisoles:** Son suelos rojos y viejos, que se caracterizan por poseer una fertilidad muy baja y altos contenidos de aluminio tóxico. Se presentan muy lixiviados, debido a la alta precipitación de las zonas húmedas en donde se encuentran. Generalmente son arcillosos.

2.10 Quinua

La quinua es una planta dicotiledónea, anual y herbácea, que alcanza una altura de hasta 3 metros aproximadamente (Bojanic, 2011). Según Mujica et. al (2006) citado por Egas et. al (2010), la quinua es un cultivo que puede crecer en grandes altitudes, soportar heladas y otros fenómenos climáticos adversos; muestra diferentes periodos vegetativos, que varía según la especie. Según Cuadrado (2012), la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) es un pseudocereal, ya que botánicamente no pertenece al grupo de las gramíneas, en el cual están los cereales como el trigo, arroz, cebada, maíz, etc.; sin embargo, se lo utiliza como un cereal, debido a su alto contenido de almidón (véase Figura 32).



**Figura 32: Planta de quinua –
variedad INIAP Tunkahuan**

2.10.1 Origen y distribución

Según Mujica & Jacobsen (2006), la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es cultivada en todos los Andes, principalmente en Perú y Bolivia, desde hace más de 7.000 años por culturas preincaicas e incaicas. Esto es corroborado por Cárdenas



Figura 34: Distribución de la quinua en el Ecuador

Fuente: (Bazile, Bertero, & Nieto, 2014)

2.10.2 Taxonomía

Taxonómicamente, la quinua se clasifica como lo describe la Tabla 12.

Tabla 12.

Clasificación taxonómica de la quinua

Categoría	Nombre
Reino	Plantae
División	Magonoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Caryophyllidae
Orden	Caryophyllales
Familia	Chenopodiaceae
Genero	Chenopodium
Nombre científico	Chenopodium quinoa

Fuente: (Bojanic, 2011)

2.10.3 Propiedades nutricionales

Debido a su alto valor nutricional, la quinua es considerada como uno de los alimentos más completos a disposición del ser humano, pues su contenido de proteína varía entre 13,81% y 21,9%, lo cual es más del doble de cualquier otro cereal; además, debido a su alto contenido de aminoácidos, es conocida como el único alimento vegetal que provee todos los aminoácidos esenciales, ubicándose cerca de los estándares que dicta la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO) para la nutrición humana (Bojanic, 2011; Cuadrado, 2012).

2.10.4 Descripción botánica

En la Figura 35, se identifican las partes de la quinua, las cuales fueron descritas botánicamente por Bojanic (2011) & Cuadrado (2012) de la siguiente manera:



Figura 35: Partes de la planta de quinua

Fuente: (FAO, 2013)

- **Raíz:** Es fibrosa, pivotante con muchas ramificaciones y alcanza una profundidad de hasta 60 cm. También presenta raíces secundarias, terciarias y raicillas, las que le permiten la absorción de agua y nutrientes del suelo.
- **Tallo:** Es erecto y cilíndrico; puede ser ramificado o no, dependiendo de las variedades, densidad de siembra y condiciones del medio en el que sea cultivado;

es de sección circular en la zona próxima a la raíz, y angular en la zona de las ramas y hojas. Así mismo, puede ser de color verde, rojo o amarillo.

- **Hojas:** Son de carácter polimórfico, lo que quiere decir que en la misma planta pueden existir varias formas de hojas, que van desde romboidales o triangulares, a lanceoladas en la parte superior; son dentadas en el borde, pudiendo tener hasta 43 dientes. De acuerdo a la importancia de sus pigmentos, sus hojas pueden ser de color verde a rojo, teniendo como colores intermedios amarillo o violeta.
- **Inflorescencia:** Es racimosa (véase Figura 36), por lo que se la denomina panícula o panoja, ya que posee un eje principal más desarrollado, del cual se originan ejes secundarios y hasta terciarios, que sostienen a los grupos de flores llamados glomérulos (véase Figura 37). El largo de la panoja en la quinua varía entre 15 a 70 cm.



Figura 36: Panoja de quinua

Fuente: (Peralta, y otros, 2012)

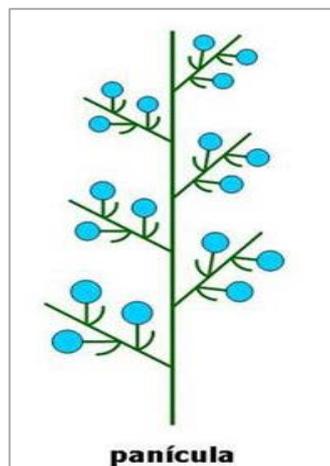


Figura 37: Inflorescencia tipo panoja

Fuente: (Universidad de Navarra, 2015)

- **Flores:** Son pequeñas, pues no alcanzan un tamaño mayor a 3mm; carecen de pétalos y pueden ser de tres tipos: hermafroditas, femeninas (pistiladas) o masculinas (androestéril). Permanecen abiertas por un periodo aproximado de 3 a 5 días.
- **Fruto:** Es un aquenio (fruto seco con una sola semilla) que contienen un grano que puede alcanzar un diámetro aproximado de 2,66 mm; de acuerdo a la variedad

puede ser de color gris, amarillo, rojizo, café o negro; está cubierto por una capa denominada pericarpio, la cual está formada por tres subcapas. Contiene una sustancia amarga conocida como saponina, la cual al ser lavada se elimina en forma de espuma.

2.10.5 Fenología

La fenología es el estudio de los fenómenos biológicos externos diferenciables que se presentan periódicamente en las plantas como resultado de su relación con el clima y el curso anual del tiempo en un determinado lugar (de Cara, 2006). A continuación, se detallan las etapas fenológicas de la quinua de acuerdo a Scotto & Chech (2008), Mullo (2011), Luzón (2016) Gómez & Aguilar (2016), las cuales también se pueden visualizar en la Figura 38.

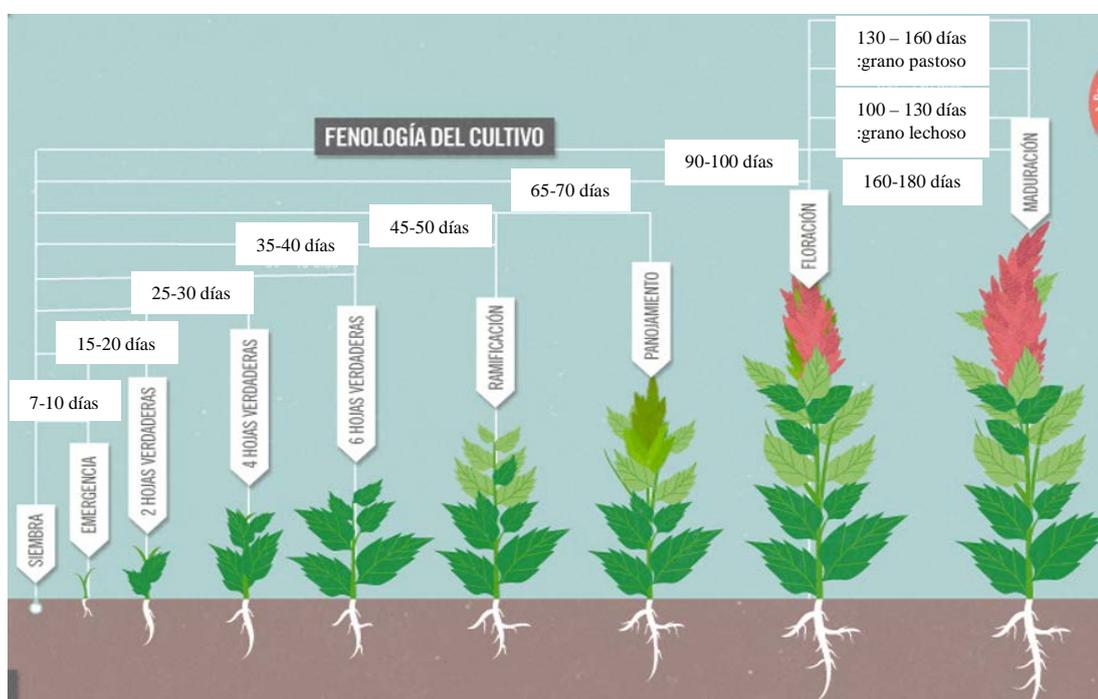


Figura 38: Fases fenológicas de la quinua

Fuente: (FAO, 2013)

- **Germinación:** Etapa donde la plántula emerge del suelo y extiende dos hojas cotiledóneas (hojas falsas). Ocurre entre los 7 y 10 días después de la siembra (dds).

- **Ciclo vegetativo (crecimiento):** Aparecen dos hojas verdaderas, lo cual ocurre aproximadamente a los 15 o 20 dds. Esta etapa comprende hasta cuando la planta tiene 6 hojas, aproximadamente a los 30 o 40 dds.
- **Ramificación:** Entre los 45 y 50 dds, la planta cuenta con 8 hojas verdaderas y la presencia de hojas axilares hasta la tercera fila de hojas en el tallo. El área foliar en esta etapa incrementa significativamente.
- **Inicio de panojamiento:** Las primeras hojas verdaderas empiezan a tomar un color amarillo, el tallo se engrosa y crece en gran medida. La inflorescencia comienza a emerger desde el ápice de la planta, aglomerándose alrededor de ella un grupo de hojas pequeñas, las cuales cubren la panoja en sus tres cuartas partes. Esto ocurre entre los 55 y 60 dds.
- **Panojamiento:** Etapa en donde la inflorescencia sobresale de las hojas, notándose con claridad los glomérulos que la conforman. Además, se forman las flores y las estructuras reproductivas. Ocurre entre los 65 y 70 dds.
- **Floración:** Inicia con la apertura de las flores (pistiladas y hermafroditas), las cuales pueden ser observadas a simple vista debido a sus colores brillantes. Durante este ciclo, el color de la panoja se intensifica, las hojas de la base continúan defoliándose y el cultivo se torna bastante sensible a sequias y heladas. Este proceso ocurre aproximadamente entre los 90 y 100 dds.
- **Maduración fisiológica:** Ocurre cuando la planta está completamente amarilla y ha perdido todas sus hojas. Los granos al ser presionados con la uña presentan resistencia a la penetración. Este periodo constituye el llenado de grano de la planta; la humedad de la misma es tan baja que facilita la trilla. Ocurre aproximadamente entre los 160 - 180 dds.

2.10.6 Variedades

Debido a su variabilidad genética, la quinua se adapta a varios climas, por lo que es cultivada en zonas que van desde el nivel del mar (0 a 500 m.s.n.m) hasta la sierra alta (3500 a 4000 m.s.n.m), con lo que se da lugar al surgimiento de varios tipos de variedades (Bojanic, 2011). En el Ecuador únicamente se cuenta con dos, las cuales son: *INIAP Tunkahuán* e *INIAP Pata de Venado* (Mina, 2014), cuyas diferencias se encuentran en la Figura 39.

QUINUA ECUADOR							
VARIEDAD	ALTURA PLANTA	DÍAS FLORAC.	DÍAS COSECHA	COLOR GRANO	CONTENIDO de SAPONINA	RENDIM. kg/ha (promedio)	ALTITUD ÓPTIMA m
INIAP TUNKAHUAN	150	109	180	Blanco	Bajo (0,06%)	2000	2600-3200
INIAP PATA DE VENADO	75	73	150	Blanco crema	Bajo (0,05%)	1400	3000-3600

Figura 39: Variedades vigentes de quinua en el Ecuador

Fuente: (Peralta, 2009)

2.10.7 Manejo agronómico del cultivo

A continuación, se describe el manejo y producción del cultivo de quinua de acuerdo a Basantes (2015), Scotto & Chech (2008), Peralta, y otros (2012):

- **Preparación del suelo:** Se realiza arada y rastra con la finalidad de que el suelo se encuentre libre de malezas.
- **Siembra:** La época de siembra de la quinua comprende desde el mes noviembre hasta febrero (época de lluvia) y desde abril hasta junio si se dispone de riego. Los sistemas de siembra son por lo general a chorro continuo, en surcos o hileras distanciados de 70-90 cm; y a una distancia de 10 a 20 cm en una siembra a golpes. Peralta, y otros (2012), recomiendan colocar de 12 a 16 kg de semilla por hectárea.
- **Fertilización:** Antes de realizar la fertilización es preferible realizar un análisis de suelo previo, aunque experimentalmente se ha hallado que la quinua necesita más Nitrógeno (N), con relación a Fósforo (P) y Potasio (K). La dosis recomendada es 80(N)-50(P)-50(K) Kg/Ha.
- **Control de enfermedades y plagas:** Para la eliminación de algunas plagas se pueden utilizar insecticidas; si el cultivo es orgánico, existen algunas alternativas: siembra de una variedad resistente, buena rotación de cultivos, descanso del terreno a un cierto punto de la rotación entre cultivos, etc. Todas éstas son buenas prácticas que van a incidir en la disminución de plagas y de enfermedades, aunque

la mayor plaga la constituyen los pájaros, específicamente cuando la planta está iniciando la maduración fisiológica.

- **Control de malezas y aporque:** Scotto & Chech (2008), recomiendan eliminar las malezas durante todo el ciclo vegetativo, con el fin de eliminar competencia por nutrientes, luz y agua. El primer deshierbe debe hacerse cuando las plantas hayan alcanzado 20 cm de altura o aproximadamente a los 50 dds. En cuanto al aporque, debe realizarse aproximadamente a los 60 dds. Además, durante esta época se puede realizar una fertilización complementaria.
- **Cosecha:** Se realiza cuando la planta haya alcanzado la madurez fisiológica, es decir una vez que las panojas, las cuales contienen los granos, se encuentren secas. La cosecha manual se la realiza utilizando hoces, cortando tallos y almacenando formando montículos.
- **Trilla:** Es el proceso que permite la separación del grano de la paja; se puede realizar manualmente y mecánicamente. Cuando se realiza manualmente, el proceso consiste en restregar la panoja seca sobre una piedra o golpear entre panojas, con la finalidad de que salga el grano. Este proceso se debe realizar con mucho cuidado para evitar la contaminación de la semilla con piedras, tierra y otras semillas.
- **Ventado y limpieza del grano:** Proceso que consiste en separar el grano de la broza (conjunto de restos de la planta) aprovechando corrientes de aire, logrando que el grano quede completamente limpio. Actualmente, existen aventadoras mecánicas manuales o propulsadas por un motor que se utilizan para este fin.
- **Almacenamiento:** El grano bien seco y limpio es almacenado en recipientes cerrados o costales de tejido estrecho; además, se los debe colocar en bodegas limpias y secas, protegiéndolos de ataques de insectos y roedores; debe existir circulación de aire y cuidar que el grano tenga menos del 12% de humedad, ya que se considera un grano seco cuando este contiene hasta un 10%.

2.10.8 Usos

De la planta de quinua se puede aprovechar sus hojas, tallo y grano. Según Montoya, Martínez & Peralta (2005), de las hojas se puede obtener harina, ensaladas, colorantes vegetales y ensilaje; del tallo se obtiene ceniza, concentrado para animales

y celulosa que sirve como materia prima de cartón y papel; y del grano, se obtiene saponina y grano perlado. La saponina es utilizada en las industrias farmacéuticas, mineras, de cosméticos, alimentos y detergentes; del grano perlado es posible obtener harina, hojuelas, extruidos, expandidos y granolas, cuyos derivados se pueden observar en la Figura 40.



Figura 40: Uso del grano de la quinua

Fuente: (Montoya, Martínez, & Peralta, 2005)

2.11 Estadística

2.11.1 Análisis de correlación

Según Díaz (2015), este tipo de análisis permite medir la fuerza de la relación existente entre variables, a través del uso de herramientas estadísticas. Para ello, se suele obtener el Coeficiente de relación de Pearson (R^2), el cual corresponde a un valor cuantitativo de la medida de la intensidad de la relación lineal entre dos variables, que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (13)$$

Donde $\sigma_X\sigma_Y$ es la covarianza de (X, Y) , σ_X es la desviación típica de la variable X y σ_Y es la desviación típica de la variable Y . Este coeficiente tiene un rango de valores desde -1 hasta 1, por lo que Díaz (2015) plantea varios tipos de correlación en base al valor que se obtenga:

Tabla 13.

Tipos de correlación

Tipo de correlación	R^2
Correlación positiva o directa perfecta	1
Correlación positiva	Mayor de 0
Correlación débil	Próxima a 0
Correlación negativa	Menor de 0
Correlación negativa o indirecta perfecta	-1

Fuente: Díaz (2015)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

De manera general, el presente proyecto combinó metodologías como: experimental, debido a que la incursión de las tecnologías geográficas en la agricultura está en auge y existen pocos estudios en el país; de campo, pues todos los datos para el desarrollo del proyecto fueron recolectados directamente en campo; y por último, comparativo, ya que se han establecido relaciones y correlaciones entre índices de vegetación y el cultivo de quinua; así como también, la relación existente del NDVI obtenido a partir de dos métodos diferentes.

En la Figura 41 se ilustra un esquema general del proceso. Se trabajó en dos zonas de estudio, determinadas como: ensayo controlado, ubicado en el IASA; y cultivo comercial, ubicado en la parroquia de Lloa (véase apartado 1.4 del cap. 1). En el ensayo controlado de quinua, se recogieron datos espectrales durante los primeros tres primeros meses de crecimiento, con el objetivo de evaluar el comportamiento y su relación con diferentes índices de vegetación. Mientras que, en el cultivo comercial, se tomaron fotografías mediante una cámara multiespectral montada sobre un UAV, con el propósito de obtener el índice NDVI; se capturaron datos con el espectroradiómetro para, igualmente, calcular el NDVI; y finalmente, comparar dichos índices y encontrar una correlación entre ellos. Cabe recalcar que el diseño experimental usado en el ensayo controlado se ajustó al del utilizado por el Ing. Emilio Basantes, docente del IASA y propietario del cultivo de quinua.

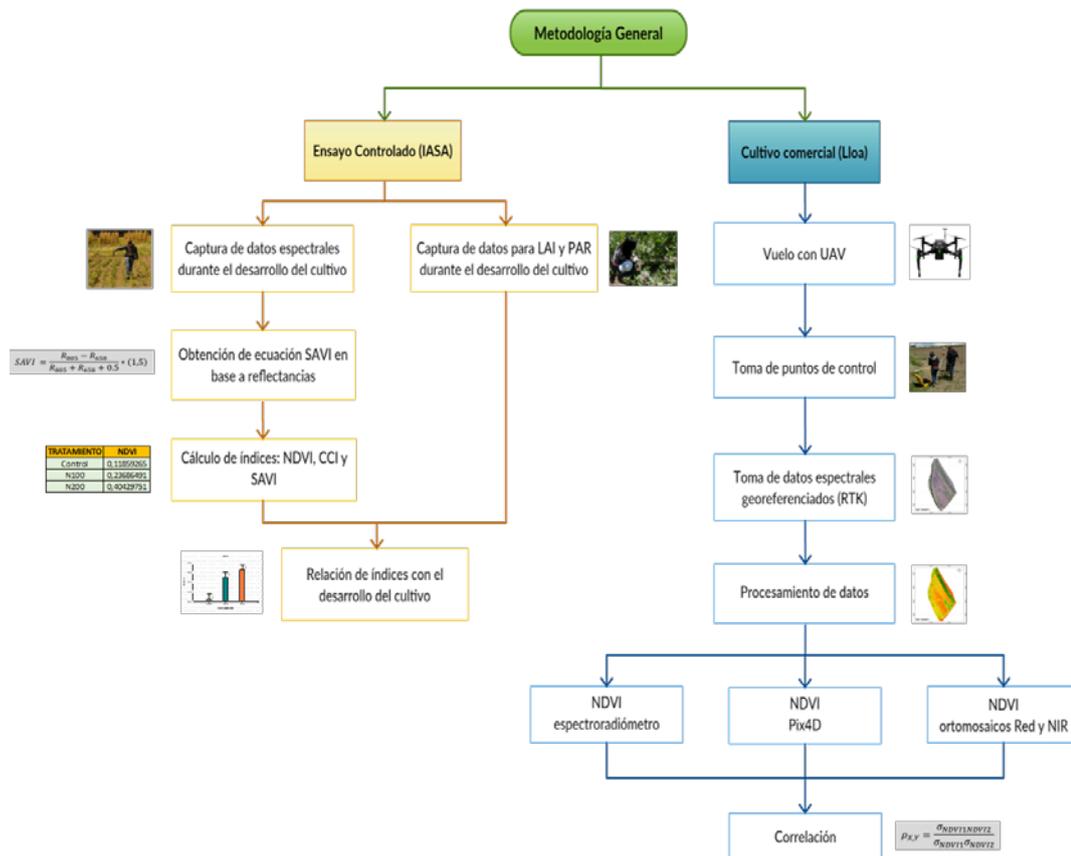


Figura 41: Esquema generalizado del proceso

3.1 Materiales y equipos

Las características de los equipos, que se enumeran a continuación, se encuentran descritas en el apartado 2.6 del capítulo de Marco Teórico; mientras que su funcionamiento y los programas vinculados se describen en los Anexos correspondientes.

3.1.1 Materiales y equipos de campo

Se utilizaron los siguientes materiales y equipos en campo:

- Espectroradiómetro FieldSpec Hi Res 4 (numeral 2.7.1 del cap. 2 y Anexo 01)
- Ceptómetro Accupar LP-80 (numeral 2.7.2 del cap. 2 y Anexo 04)
- UAV DJI Matrice 100 (numeral 2.7.3.1 del cap. 2)

- Cámara RGB marca Zenmuse X3 (numeral 2.7.3.2 del cap. 2)
- Cámara multiespectral marca Parrot Sequoia (numeral 2.7.3.3 del cap. 2)
- GPS de precisión Trimble R8 (numeral 2.7.4 del cap. 2)
- Teléfono móvil iPhone con aplicación MapPilot (numeral 3.3.1 del cap. 3)

3.1.2 *Materiales y equipos de gabinete*

Se utilizaron los siguientes materiales y equipos en gabinete:

- Computadores de escritorio, con el respectivo software de procesamiento: View Spec Pro TM versión 5.6 (Anexo 02), Infostat versión 2008 (Anexo 06), Pix4D Mapper Pro versión 3.2 (Anexo 07), ArcGIS 9.3, Trimble Business Center (numeral 3.3.1 del cap. 3), Microsoft Office.
- Computador adjunto al espectroradiómetro con el software RS³ (Anexo 01).
- Material de oficina

3.2 **Ensayo Controlado (EC)**

3.2.1 *Planificación*

Esta fase comprende la planificación de tres aspectos, que se explican a continuación:

- **Características del ensayo controlado y selección de parcelas a muestrear**

El cultivo de quinua utilizado corresponde al ensayo de la tesis doctoral en elaboración del Ing. Emilio Basantes, docente de la Sede de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE (IASA); por lo tanto, el diseño se ha ajustado al esquema de distribución preestablecido, como lo indica la Figura 42, el cual corresponde a un diseño de parcela dividida en un arreglo de Bloques Completos al Azar (DBCA), con 4 repeticiones (en total 48 unidades experimentales de 35 m² cada una), donde el bloque principal es la quinua con y sin haba (líneas rojas) y las parcelas son las diferentes dosis de Nitrógeno, mismas que se identifican como

el tratamiento del experimento (líneas azules). Las unidades experimentales de estudio que se encuentran sombreadas en la Figura 42 fueron las utilizadas en el presente proyecto; es decir, aquellas con dosis de 0, 100 y 200 Kg de Nitrógeno por hectárea (Kg/Ha). La fertilización usada corresponde a Úrea con una concentración del 46% de nitrógeno. Cada parcela tiene 6 surcos y la variedad de quinua utilizada fue INIAP Tunkahuan.

Lote 1		Lote 2		Lote 3		Lote 4	
Q-H	Quinoa	Q-H	Quinoa	Q-H	Quinoa	Q-H	Quinoa
Repetición 4		Repetición 3		Repetición 2		Repetición 1	
N50	N150	N250	N100	N150	N200	N250	Control
N250	N250	N100	Control	N200	N250	N50	N150
N150	Control	N150	N200	Control	N100	N200	N250
N200	N100	N200	N250	N250	N150	N100	N200
N100	N50	Control	N50	N100	Control	N150	N50
Control	N200	N50	N150	N50	N50	Control	N100

Figura 42: Esquema de distribución del ensayo y parcelas utilizadas

En la Figura anterior, la letra “N” en cada parcela hace referencia a “Nitrógeno” y su valor adyacente a la cantidad en Kg/Ha utilizada. Las parcelas “Control” son aquellas a las que no se les colocó fertilizante. “Q-H” se refiere a los bloques que combinan quinua y haba.

- **Metodología de captura general de datos espectrales para todos los muestreos**

Los datos espectrales para el cultivo controlado se tomaron utilizando el Espectroradiómetro Field Spec Hi Res 4.

Cada parcela tiene un tamaño de 35 m². Debido a los efectos de borde, los cuales pueden ocasionar alteraciones en los resultados, los muestreos se realizaron en un área disminuida 2 metros en cada lado, quedando así un área efectiva de 15 m², cómo se puede observar en la Figura 43.

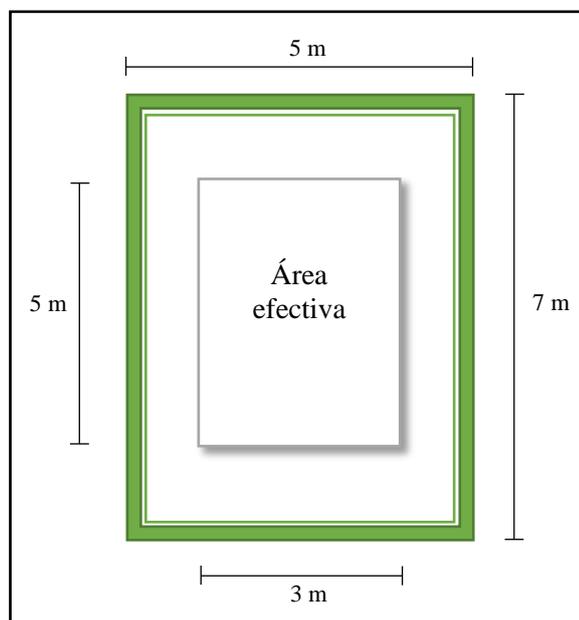


Figura 43: Parcela y área efectiva utilizada

- **Tiempos de muestreo**

Dentro de la planificación de los tiempos de muestreo (cada cuánto se tomarán los datos) se ha considerado la fenología de la quinua como base, la cual se encuentra explicada en el apartado 2.10.5 del capítulo 2, en donde se detallan las etapas fenológicas de la planta con sus correspondientes tiempos de duración. En la Tabla 14 se aprecian los cuatro muestreos realizados (Preliminar, I, II y III), la etapa fenológica, el intervalo de duración de cada etapa (expresado en dds: días después de la siembra) y el dds exacto en el que se tomó la muestra.

Tabla 14.

Tiempos de muestreo

Muestreo	Preliminar	I	II	III
Etapas fenológicas	Antes de la siembra	Ciclo vegetativo	Ramificación	Panojamiento

CONTINÚA 

Intervalo dds	0	0-40	40-50	50-70
dds en el que se tomó la muestra	0	37	51	72

3.2.2 Captura y procesamiento de datos espectrales en cada muestreo

3.3.2.1 Muestreo preliminar en EC

Se realizó un muestreo antes de la siembra con la finalidad de construir una ecuación para cálculo del índice SAVI, en base a reflectancias, ya que la ecuación descrita en el apartado 2.5.3 del capítulo 2, está basada en longitudes de onda (λ) de las bandas Rojo e Infrarrojo de un sensor.

En la Figura 44 se puede apreciar la metodología utilizada en el muestreo preliminar.

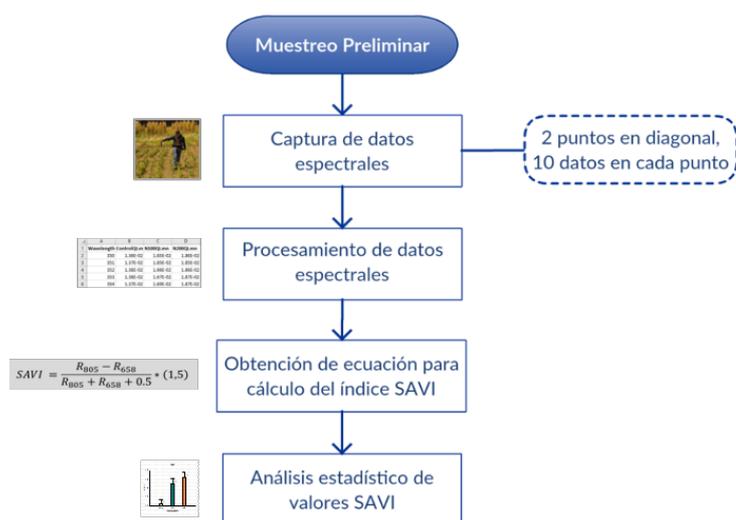


Figura 44. Diagrama de flujo para muestreo preliminar

- **Captura de datos espectrales en EC**

En primer lugar, se ejecutó el armado y calibración del espectroradiómetro, el cual se encuentra explicado en el Anexo 01. En cuanto a la toma de datos espectrales, se realizó en dos puntos en una diagonal de cada una de las parcelas en estudio (véase

Figura 45), considerando el área efectiva antes mencionada, ilustrada en la Figura 43. En cada punto se tomaron 10 datos a una altura aproximada de 1.10 m sobre el suelo y con un IFOV de 1°. La captura de los datos con el espectroradiómetro mediante el software RS³ se explica en el Anexo 01.

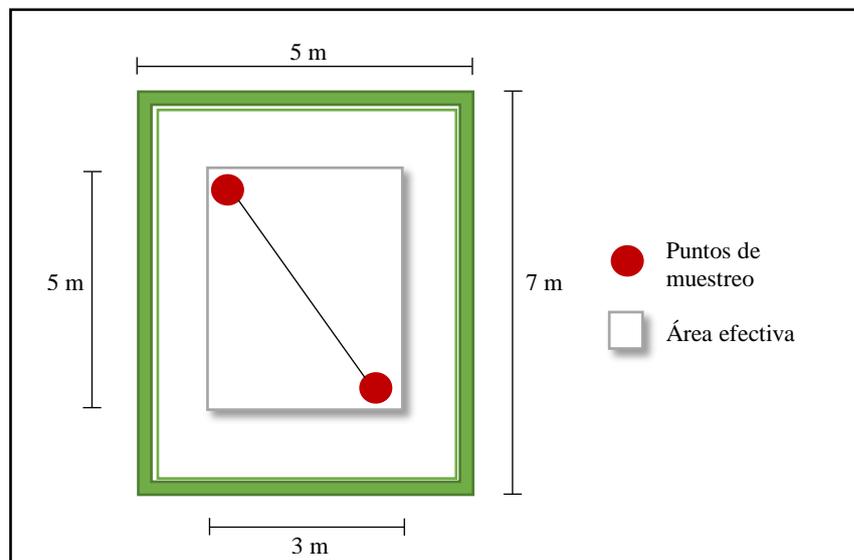


Figura 45: Esquema del muestreo inicial por parcela

- **Procesamiento de datos espectrales en EC**

Los datos obtenidos en campo (archivos *.asd*) fueron descargados, para luego ser procesados en el software *ViewSpec Pro* (véase Anexo 02). A dichos datos se les promedió para obtener uno solo por cada parcela; se obtuvieron firmas espectrales agrupadas por dosis de fertilización y por repeticiones, mismas que se detallan en el Anexo 03. A continuación, se exportaron los promedios por repetición en formato *.txt*, y luego fueron guardados en formato *.xls*. Estos archivos contienen 4 columnas, como se aprecia en la Figura 46: la primera es la longitud de onda (Wavelength) y las 3 siguientes son las reflectancias; en este caso, de la parcela Control, N100 y N200 de la Repetición I. Como se observa, los valores extraídos del equipo son muy bajos, pues no se encuentran expresados como porcentaje.

	A	B	C	D
1	Wavelength	ControlQI.m	N100QI.mn	N200QI.mn
2	350	1.36E-02	1.65E-02	1.86E-02
3	351	1.37E-02	1.65E-02	1.85E-02
4	352	1.38E-02	1.66E-02	1.86E-02
5	353	1.38E-02	1.67E-02	1.87E-02
6	354	1.37E-02	1.69E-02	1.87E-02
7	355	0.01371332	1.68E-02	1.88E-02
8	356	1.39E-02	0.01685852	0.01889663
9	357	1.40E-02	1.69E-02	1.90E-02
10	358	1.38E-02	1.68E-02	1.89E-02
11	359	1.41E-02	1.72E-02	1.93E-02
12	360	1.44E-02	1.75E-02	1.97E-02
13	361	1.44E-02	1.75E-02	1.97E-02
14	362	1.42E-02	1.72E-02	1.94E-02
15	363	1.41E-02	1.71E-02	1.92E-02
16	364	1.43E-02	1.74E-02	1.94E-02
17	365	0.01460155	1.77E-02	1.99E-02
18	366	1.45E-02	1.77E-02	1.99E-02
19	367	1.46E-02	1.77E-02	0.01991482
20	368	1.46E-02	1.78E-02	2.00E-02
21	369	1.46E-02	1.78E-02	2.01E-02
22	370	1.46E-02	1.77E-02	2.00E-02

Figura 46: Extracto tabla que contiene datos espectrales tomados por el espectrorradiómetro

- **Obtención de ecuación para cálculo del índice SAVI**

Primeramente, se consideraron imágenes de satélite utilizadas en el Ecuador y de ellas se obtuvieron los anchos de longitudes de onda en las bandas Rojo e Infrarrojo y sus promedios correspondientes, mismos que se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15.

Anchos de banda y valores promedio de satélites seleccionados

Satélite	Rango λ Rojo (nm)		Promedio R (nm)	Rango λ Infrarrojo (nm)		Promedio IR (nm)
SPOT 7	625	695	660	760	890	825
Pléiades IA	600	720	660	750	950	850
RapidEye	630	685	658	760	850	805

Fuente: Recopilado y modificado de Airbus Defence and Space (2017a); Airbus Defence and Space (2017b); Satellite Imaging Corporation (2017)

Los valores promedio fueron reemplazados en la Ecuación (4) (apartado 2.5.3 del cap. 2) para cálculo de SAVI y se obtuvieron las siguientes ecuaciones en base a reflectancias:

$$SAVI (RapidEye) = \frac{R_{805} - R_{658}}{R_{805} + R_{658} + 0.5} * (1 + 0.5) \quad (14)$$

$$SAVI (Spot 7) = \frac{R_{825} - R_{660}}{R_{825} + R_{660} + 0.5} * (1 + 0.5) \quad (15)$$

$$SAVI (Pléiades IA) = \frac{R_{850} - R_{660}}{R_{850} + R_{660} + 0.5} * (1 + 0.5) \quad (16)$$

Se consideró un valor de 0.5 para L , el cual, según Sánchez et. al (2000), es el recomendado para densidades intermedias de vegetación, que corresponde al cultivo en estudio.

A continuación, se reemplazaron las reflectancias tomadas en campo en las ecuaciones anteriores y se calculó el índice SAVI con cada una de ellas. Por ejemplo, en la Figura 47 se puede observar sombreados los valores de reflectancia de las parcelas Control, N100 y N200 de la Repetición I para la longitud de onda 658 nm, valor correspondiente al promedio de la banda Roja de RapidEye.

	A	B	C	D
1	Wavelength	ControlQI.mn	N100QI.mn	N200QI.mn
301	649	0.03903983	0.05109183	0.06010536
302	650	0.03924878	0.05136884	0.06041382
303	651	0.03937463	0.05151534	0.06060426
304	652	0.03952665	0.05171897	0.06083214
305	653	0.03963192	0.05186999	0.06101177
306	654	0.03966187	0.05191062	0.06110109
307	655	0.03980117	0.05207521	0.06129492
308	656	0.04002811	0.05237794	0.06159892
309	657	0.04025113	0.05268018	0.06191354
310	658	0.04040122	0.05285922	0.06215135
311	659	0.04056936	0.05307021	0.06239155
312	660	0.04071854	0.05327514	0.06262440
313	661	0.04083842	0.05344513	0.06282496
314	662	0.04095495	0.05358090	0.06298207
315	663	0.04114047	0.05377250	0.06323979

Figura 47: Extracto tabla longitud de onda vs reflectancias

Los valores calculados de SAVI fueron agrupados en una tabla según el tratamiento (dosis de fertilización utilizada), repetición (lote) y sensor, la cual se encuentra en el apartado 4.1.1 del capítulo de Resultados.

- **Análisis estadístico de valores SAVI**

Posteriormente, se realizó el análisis estadístico de los datos, que comprendió un Análisis de Varianzas (ADEVA) con el software InfoStat (véase Anexo 06).

La prueba de hipótesis planteada para el ADEVA se describe a continuación:

H₀: No existen diferencias significativas en el uso de longitudes de onda de diferentes sensores remotos para la construcción de la ecuación del índice SAVI en base a reflectancias

H_a: Existen diferencias significativas en el uso de longitudes de onda de diferentes sensores remotos para la construcción de la ecuación del índice SAVI en base a reflectancias

La regla de decisión para comprobar las hipótesis planteadas viene dada por el estadístico ρ :

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

Si el valor ρ es menor o igual a 0.05 (nivel de significancia $\alpha = 5\%$), se rechaza la hipótesis nula; lo cual quiere decir que existen diferencias significativas en el conjunto de datos y, por lo tanto, no es lo mismo usar unas u otras longitudes de onda de los sensores analizados para la construcción de la ecuación de SAVI. Seguidamente, se realizó pruebas de significancia de Tukey al 5%, con el fin de conocer cómo se agrupan los datos en rangos de acuerdo a su comportamiento similar.

Los resultados de este análisis se encuentran en el punto 4.1.1 del capítulo de Resultados.

3.3.2.2 Muestreos 1, 2 y 3 en EC

En la Figura 48 se puede apreciar la metodología utilizada para la toma de datos en los muestreos 1, 2 y 3.

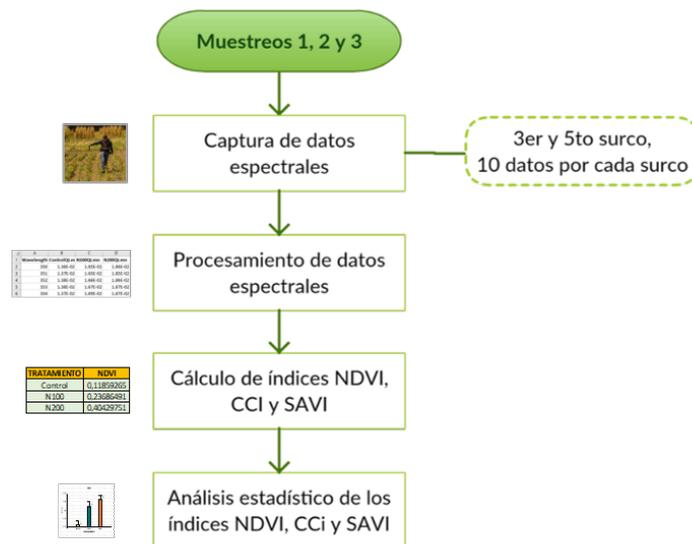


Figura 48: Diagrama de flujo para muestreos 1, 2 y 3

- **Captura de datos espectrales en EC**

El armado y calibración del espectroradiómetro se realizó de la misma manera que en el muestreo preliminar (véase Anexo 01).

En cuanto a la toma de datos espectrales, solamente se realizaron en el tercer y quinto surco de cada una de las parcelas en estudio (véase Figura 49), considerando el área efectiva antes mencionada. Dichos surcos fueron elegidos al azar y considerando el efecto de borde. En cada surco se tomaron 10 datos a una altura aproximada de 1.10 m sobre el suelo con un IFOV de 1°. La captura de los datos con el espectroradiómetro mediante el software RS³ se encuentra explicado en el Anexo 01.

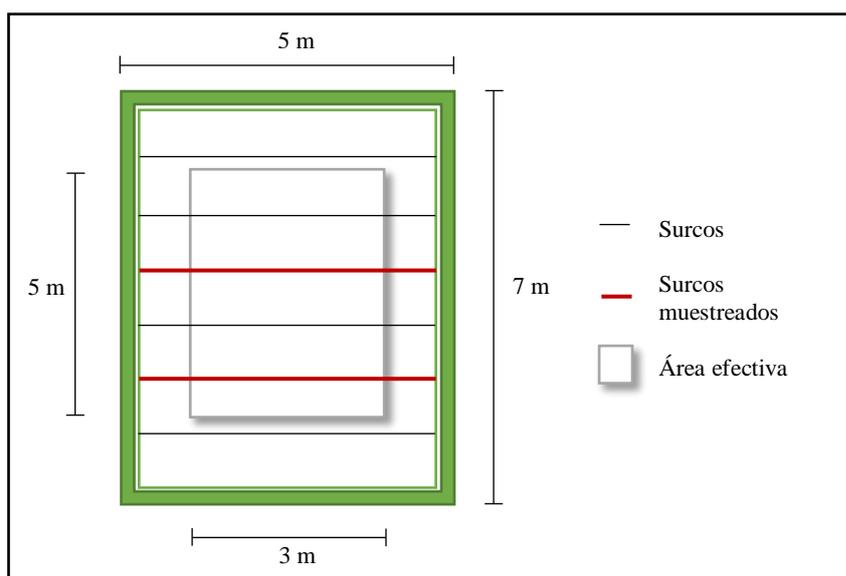


Figura 49: Esquema de los muestreos 1, 2 y 3 por parcela

- **Procesamiento de datos espectrales en EC**

Los datos obtenidos en campo (archivos *.asd*) fueron descargados, para luego ser procesados en el software ViewSpec Pro (véase Anexo 02). A dichos datos se los promedió para obtener uno solo por cada parcela; y se obtuvieron firmas espectrales agrupadas por dosis de fertilización y por repeticiones, las que se muestran con mayor detalle en el Anexo 03. A continuación, se exportaron los promedios y sus primeras derivadas por repetición en formato *.txt* (para mayor detalle véase Anexo 02), y luego fueron guardados en formato *.xls*. Estos archivos contienen las mismas 4 columnas que se muestran en la Figura 47.

- **Cálculo de índices NDVI, CCI y SAVI**

Se reemplazaron las reflectancias tomadas en campo en la Ecuación (2) (véase numeral 2.5.1 del cap. 2) para calcular NDVI, en la Ecuación (3) para calcular CCI (véase numeral 2.5.2 del cap. 2) y en la Ecuación (14) para calcular SAVI (véase el apartado 4.1.1 del cap. 4). Por ejemplo, en la Figura 50 se puede observar sombreados los valores de reflectancia de las parcelas Control, N100 y N200 de la Repetición III para la longitud de onda 750 nm, mismos que fueron sustituidos en la Ecuación (2) para obtener NDVI.

Wavelength	Control Ill.mn	n100 Ill.mn	n200 Ill.mn
743	0.322729915	0.460048914	0.294202715
744	0.324808002	0.463345498	0.296017945
745	0.326760501	0.466412425	0.29775244
746	0.328448504	0.469143182	0.299228042
747	0.32999289	0.471675009	0.30059883
748	0.331498325	0.474115014	0.301983863
749	0.332836568	0.47630018	0.303180099
750	0.33405748	0.478284925	0.304273188
751	0.335155934	0.48008287	0.305269033
752	0.336119384	0.481700391	0.306154758
753	0.336956978	0.483127981	0.306936264
754	0.337699771	0.484385669	0.30757916
755	0.338335782	0.485473722	0.308106691
756	0.338796616	0.486335814	0.308533967
757	0.338752419	0.48654905	0.308505803
758	0.339119732	0.487278521	0.308879226

**Figura 50: Extracto tabla
longitud de onda vs reflectancias**

Los índices obtenidos fueron agrupados en tablas según el tratamiento (dosis de fertilización utilizada), repetición (lote) y estado, cuyos resultados se encuentran en los apartados 4.1.2, 4.1.3 y 4.1.4 del capítulo 4.

- **Análisis estadístico de los índices NDVI, CCI y SAVI**

Dentro de la parte estadística, se realizó un Análisis de Varianzas (ADEVA) con el software InfoStat (véase Anexo 06) unificando todos los muestreos. Las variables analizadas se visualizan en la Tabla 16.

Tabla 16.

Variables del diseño experimental

Variables	n
Dosis de fertilización (Tratamiento)	3
Repeticiones	4
Estados fenológicos	3
Total	36

La prueba de hipótesis planteada para el ADEVA se describe a continuación:

Ho: No es posible usar los índices de vegetación NDVI, CCI y SAVI para identificar diferencias en el desarrollo de la quinua

Ha: Es posible usar índices de vegetación NDVI, CCI y SAVI para identificar diferencias en el desarrollo de la quinua

La regla de decisión para comprobar las hipótesis planteadas viene dada por el estadístico ρ :

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

Si el valor ρ es menor o igual a 0.05 (nivel de significancia $\alpha = 5\%$), se rechaza la hipótesis nula; lo que quiere decir que existen diferencias significativas en el conjunto de datos y, por lo tanto, es posible el uso de índices para los objetivos planteados. Para esos casos, se realizaron pruebas de significancia de Tukey al 5%, con el fin de conocer cómo se agrupan los datos en rangos de acuerdo a su comportamiento similar.

Los resultados de estos análisis se encuentran en los puntos 4.1.2, 4.1.3 y 4.1.4 del capítulo de Resultados.

3.2.3 Captura y procesamiento de datos para LAI y PAR en cada muestreo

En la Figura 51 se visualiza la metodología utilizada en la captura de datos para LAI y PAR.

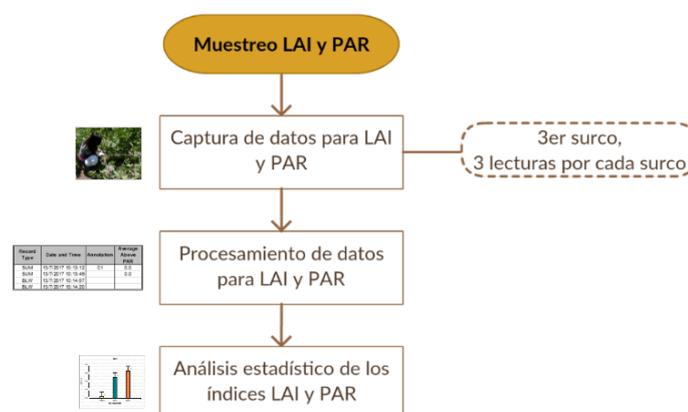


Figura 51: Diagrama de flujo para toma de datos para LAI y PAR

- **Captura de datos para LAI y PAR en EC**

En el Anexo 04 se indica el proceso de preparación y calibración del ceptómetro, equipo con el que se tomaron estos datos. Posteriormente, se procedió a tomar tres lecturas en el tercer surco de cada parcela (véase Figura 52 y Figura 53). Este surco fue elegido al azar y considerando el efecto de borde.



Figura 52: Toma de datos con ceptometro

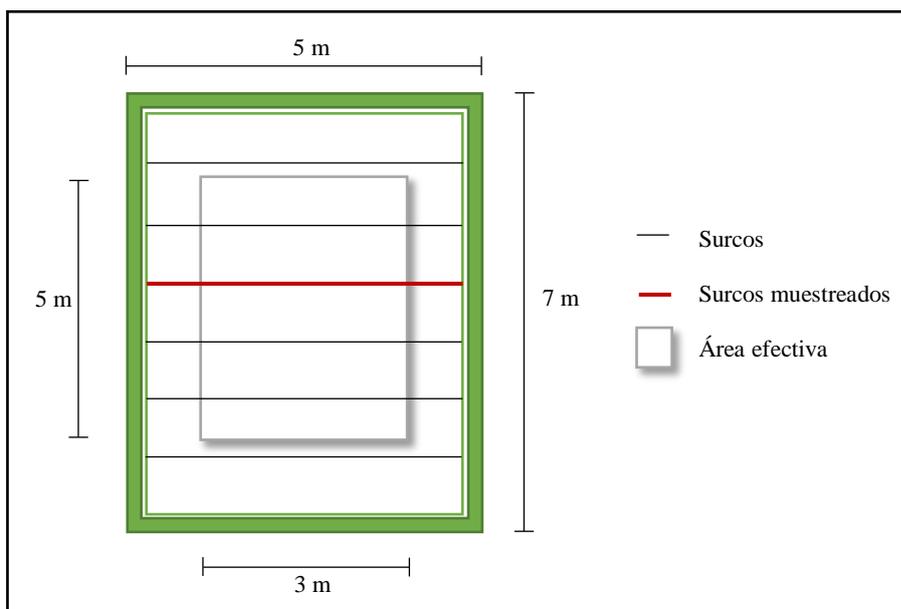


Figura 53: Toma de datos con ceptometro

- **Procesamiento de datos para LAI y PAR en EC**

Se obtuvieron los índices LAI y PAR mediante el software LP-80 Utility, con el que se descargó el archivo *.xls* que genera el equipo automáticamente (véase Anexo 04), en donde se encuentra el valor de los índices LAI y PAR (véase Anexo 05). Seguidamente, se construyó una tabla general con la información para realizar el análisis estadístico en el software InfoStat, la que se encuentra en el punto 4.1.6 del capítulo de Resultados.

Cabe aclarar que estos datos fueron capturados solamente en el segundo y tercer muestreo; debido a que la quinua no tenía un tamaño apropiado para el análisis de estos datos al momento de realizar el primer muestreo, propio del estado fenológico en el que se encontraba (ciclo vegetativo; altura máxima: 15 cm).

- **Análisis estadístico de los índices LAI y PAR**

De la misma forma que con los datos espectrales, se realizó el análisis estadístico de los datos, que comprendió un Análisis de Varianzas (ADEVA) con el software InfoStat (véase Anexo 06).

La prueba de hipótesis planteada para el ADEVA se describe a continuación:

Ho: No es posible usar los índices LAI y PAR para identificar diferencias en el desarrollo de la quinua

Ha: Es posible usar índices LAI y PAR para identificar diferencias en el desarrollo de la quinua

La regla de decisión es la misma que en los datos espectrales.

Los resultados de estos análisis se encuentran en el numeral 4.1.6 del capítulo de Resultados.

3.3 Cultivo Comercial (CC)

En el cultivo de quinua ubicado en la parroquia de Lloa, se realizó un vuelo con UAV, tomando imágenes RGB y multiespectrales, con el fin de evaluar la correlación existente entre diferentes métodos de obtención de NDVI.

3.3.1 NDVI mediante UAV

En la Figura 54, se aprecia de manera general la metodología utilizada para la obtención de NDVI a partir de imágenes capturadas con UAV en el cultivo comercial.

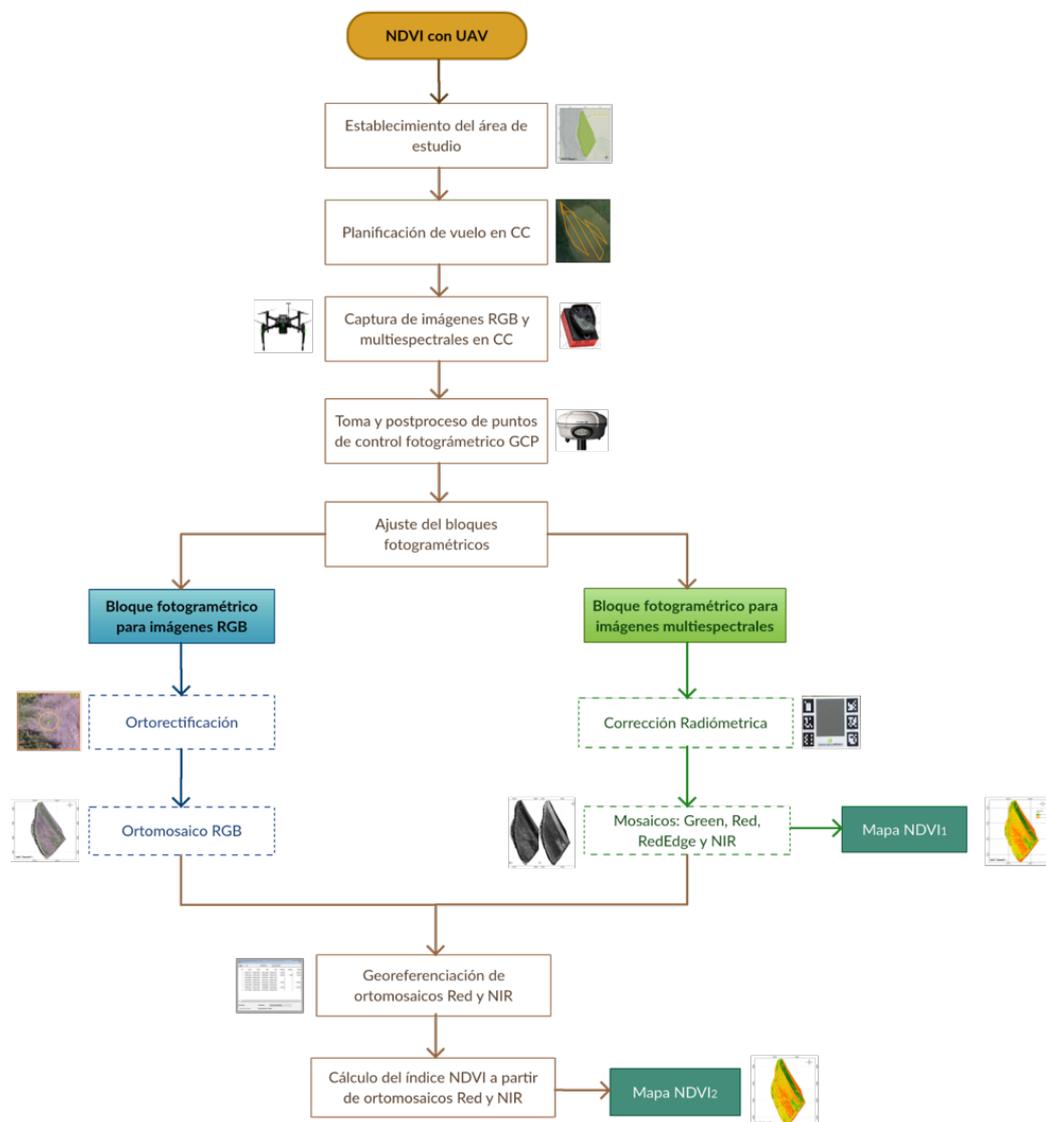


Figura 54: Diagrama de flujo para la obtención de NDVI mediante UAV

- **Establecimiento del área de estudio**

En la Parroquia de Lloa, Cantón ²Quito, se accedió a un cultivo de quinua de aproximadamente 1,7 Ha (véase numeral 1.4 del cap. 1), localizado en la Hacienda “Concepción de Monjas” (véase Figura 55), en donde se realizó un vuelo con UAV y se tomaron datos con espectroradiómetro.



Figura 55: Cultivo comercial de quinua

- **Planificación de vuelo en CC**

Inspeccionada el área, se procede a la planificación del vuelo con la ayuda de la aplicación para iOS *Map Pilot* (ver Figura 56), donde se importó el área de estudio previamente almacenada en formato *.kml*.

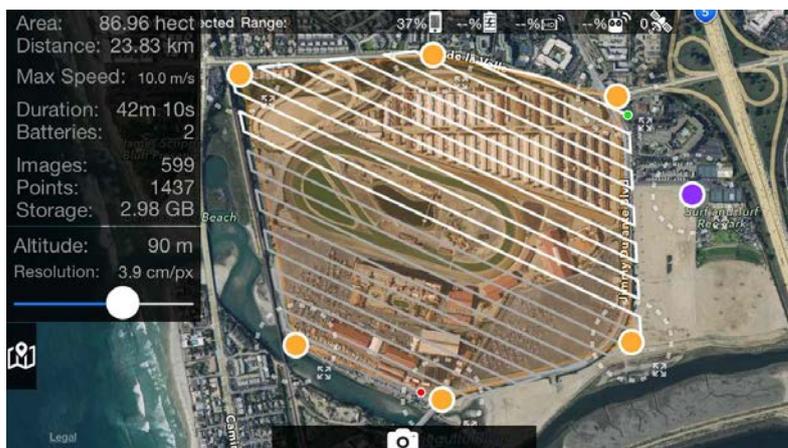


Figura 56: Ejemplo de uso de la app *Map Pilot*

Fuente: (Drones Made Easy, 2017)

Adicionalmente, se definieron los parámetros de vuelo que se encuentran ilustrados en la Tabla 17.

Tabla 17.

Variables ingresadas del vuelo con UAV

Variables	Valor
Área de estudio	1,7 Ha
Altura de vuelo	100 m
Traslapo longitudinal	80%
Traslapo transversal	80%

- **Captura de imágenes RGB y multiespectrales en CC**

Se procede a la captura de imágenes con el UAV DJI Matrice 100 (véase Figura 57 y Figura 58), utilizando dos cámaras a la vez en un solo vuelo: Zenmuse X3, para imágenes RGB; y Parrot Sequoia, para imágenes multiespectrales.



Figura 57: UAV DJI Matrice 100



Figura 58: Despegue del UAV

Parámetros como el GSD y líneas de vuelo, son calculados automáticamente por la aplicación móvil *Map Pilot*. En la Tabla 18, se visualizan sus registros, junto con los demás parámetros resultantes.

Tabla 18.***Variables resultantes del vuelo con UAV***

Variables	Valor
Tamaño del GSD (píxel)	5 cm (RGB) 12,9 cm (Multiespectral)
Velocidad promedio de vuelo	4.32 m/s
Tiempo de vuelo	6 min 50 seg
Líneas de vuelo	5
Número de imágenes	45 (RGB) 404 (Multiespectral)

- **Toma y postproceso de puntos de control fotogramétrico (GCP)**

Utilizando el método *FastStatic*, se tomó puntos de apoyo fotogramétrico para generar el ortomosaico RGB (véase Figura 59), con el objetivo de ubicar el mosaico en coordenadas verdaderas sobre la superficie terrestre. Estos puntos fueron tomados con el GPS de precisión Trimble R8, cuya descripción se encuentra en el numeral 2.7.4 del capítulo 2.

**Figura 59: Toma de GCP**

Luego de obtener las coordenadas de la base, se descargaron los datos y se procedió al postproceso en el software *Trimble Business Center* (TBC) (véase Figura 60), en donde fueron ajustados los puntos mediante la utilización de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME); específicamente, la Estación EPEC,

ubicada en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE; correspondiente a la semana GPS 1959, día 207, equivalente al día 27 de Julio del 2017.

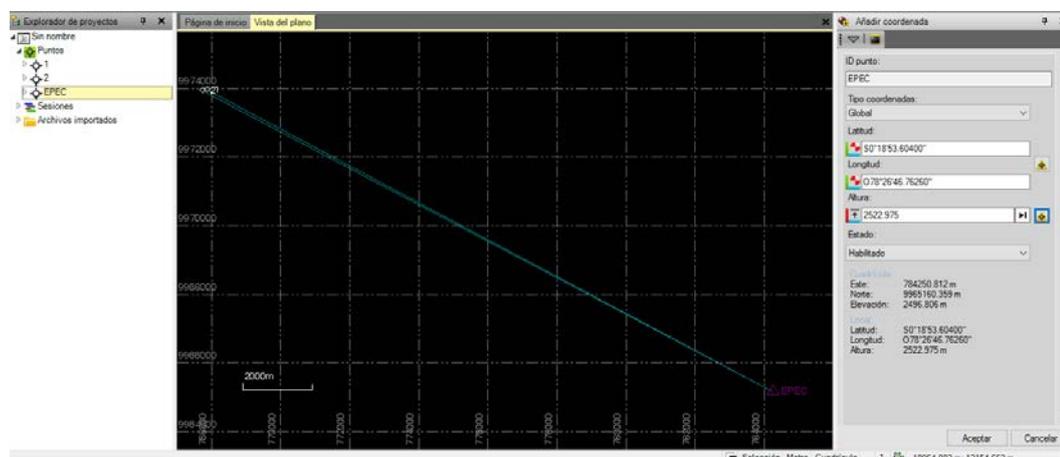


Figura 60: Postprocesamiento de puntos de control en TBC

Las coordenadas ajustadas se presentan en la Figura 61, cuyo marco de referencia es ITRF2008.

A:		1			
	Cuadrícula		Local		Global
Este	767890.488 m	Latitud	S0°14'08.02802"	Latitud	S0°14'08.02802"
Norte	9973940.029 m	Longitud	W78°35'35.62247"	Longitud	W78°35'35.62247"
Elevación	3146.604 m	Altura	3146.604 m	Altura	3146.604 m

A:		2			
	Cuadrícula		Local		Global
Este	767747.191 m	Latitud	S0°14'08.59295"	Latitud	S0°14'08.59295"
Norte	9973922.693 m	Longitud	W78°35'40.25428"	Longitud	W78°35'40.25428"
Elevación	3151.995 m	Altura	3151.995 m	Altura	3151.995 m

Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (Metro)	Prec. V. (Metro)	Aci. geod.	Dist. elip (Metro)	ΔAltura (Metro)
EPEC --- 1 (B1)	EPEC	1	Fija	0.005	0.026	298°12'28"	18557.158	623.629
EPEC --- 2 (B2)	EPEC	2	Fija	0.006	0.011	297°57'11"	18675.354	629.020

Figura 61: Coordenadas de los GCP postprocesados con TBC y sus precisiones

- **Ajuste de bloques fotogramétricos**

Las imágenes obtenidas con ambas cámaras se procesaron en el software *Pix4D*, proceso que se encuentra explicado con mayor detalle en el Anexo 07. De

manera general, el software realiza automáticamente la orientación interna, a través de los metadatos de la cámara y las coordenadas de los centros de las imágenes; y orientación externa, mediante los ángulos de rotación de la cámara (ω , ϕ y κ). A través de los centros de las imágenes, *Pix4D* genera automáticamente *Tie Points* para enlazar entre sí las imágenes y formar el ortomosaico. Todo este proceso se conoce en el programa como *Procesamiento Inicial*.

En el cultivo comercial, se realizaron dos bloques fotogramétricos: uno para las imágenes RGB, y otro para las multiespectrales; a continuación, se explica su postproceso:

- Bloque fotogramétrico para imágenes RGB

Se utilizó el módulo *Mapas 3D* de *Pix4D* (véase Figura 62), mismo que permite la generación de ortomosaicos en base a imágenes RGB.

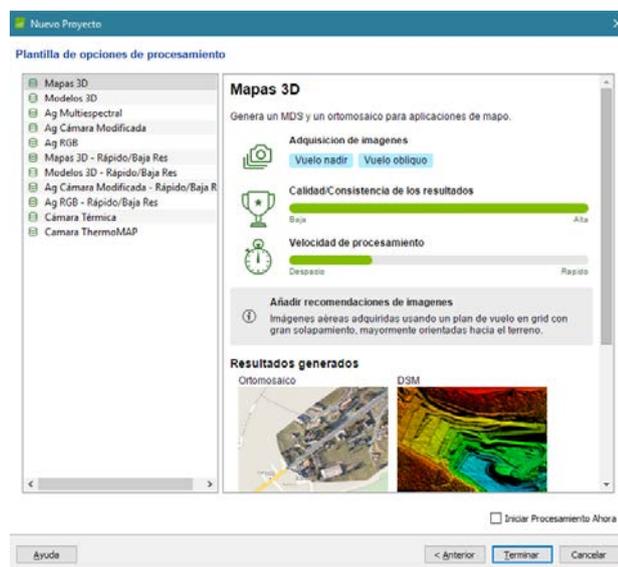


Figura 62: Módulo *Mapas 3D* en *Pix4D*

Luego del procesamiento inicial, se realizó la ortorectificación, mediante el ingreso de las coordenadas de los GCP. El software identifica automáticamente las imágenes que contienen los puntos de apoyo fotogramétrico ingresados, haciendo más sencillo el pinchado sobre ellas. Posteriormente, el software genera una nube de puntos, y por último el ortomosaico, el cual se encuentra en el numeral 4.2.1 del

capítulo de Resultados. El Anexo 07 explica con detalle los pasos realizados en el programa.

- Bloque fotogramétrico para imágenes multiespectrales

Se utilizó el módulo *Ag Multiespectral* de *Pix4D* (véase Figura 63), el que permite el procesamiento de imágenes multiespectrales y obtención de mapas de índices de vegetación.

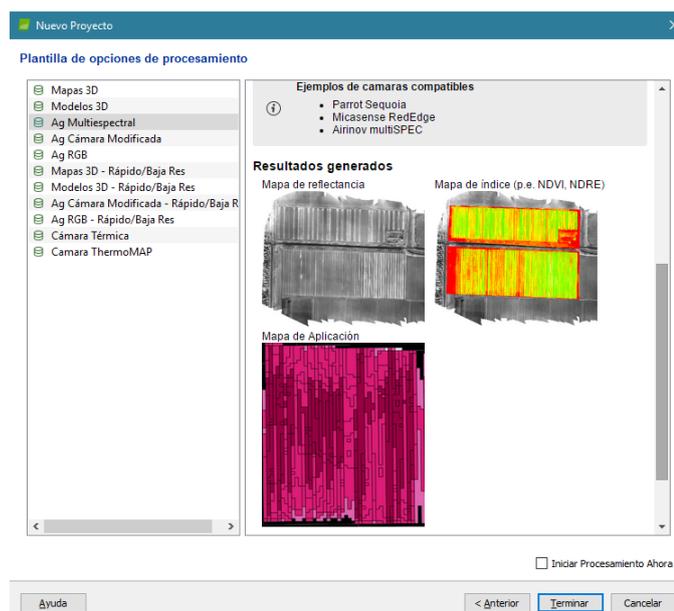


Figura 63: Módulo *Ag Multiespectral* en *Pix4D*

Antes de comenzar con el procesamiento inicial, se ingresaron las imágenes de calibración para realizar la corrección radiométrica, que tiene por objetivo convertir los valores de radiancia en reflectancia. Para ello, fue necesaria la obtención de imágenes del target de calibración AIRINOV con la cámara multiespectral después del vuelo del UAV (véase Figura 64).

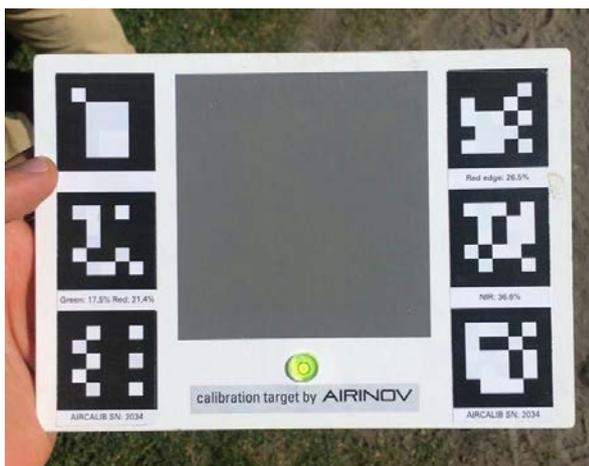


Figura 64: Target de calibración AIRINOV

Posteriormente, se efectuó el procesamiento inicial y la generación de la nube de puntos. A partir de esto, se obtuvieron mosaicos por cada banda del sensor: Green (Verde), Red (Rojo), RedEdge y NIR (Infrarrojo Cercano) (véase numeral 4.2.1 del cap. 4) y un mapa que contiene los valores de NDVI calculados automáticamente por el programa ($NDVI_i$) (véase apartado 4.2.2 del cap. 4).

- **Georeferenciación de mosaicos Red y NIR**

Por dificultad de marcar los GCP sobre las imágenes multiespectrales, se decidió ajustar los mosaicos Red y NIR al ortomosaico RGB por georeferenciación.

Con el objeto de que los mosaicos Red y NIR coincidan espacialmente con el ortomosaico RGB, se consideraron ocho puntos de apoyo identificables en los tres mosaicos (véase Figura 65).



Figura 65: Puntos de apoyo sobre ortomosaico RGB

Para ejecutar la georeferenciación, se utilizó la herramienta *Georeferencing* del software *ArcGIS*. En este proceso se alcanzó un RMS de 0,05 para Red (véase Figura 66) y 0,07 para NIR (véase Figura 67). Los ortomosaicos se presentan en el numeral 4.2.1 del capítulo 4.

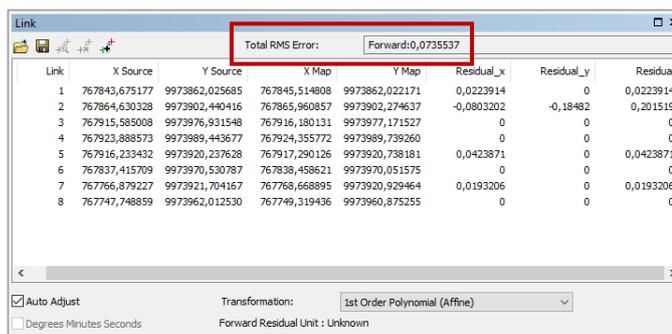
Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
1	767843,630108	9973862,046738	767845,514808	9973862,022171	-0,0821512	0	0,0821512
2	767864,369975	9973902,168990	767865,960857	9973902,274637	0,0749717	0	0,0749717
3	767916,120546	9973920,241225	767917,290126	9973920,738181	0,0490029	0	0,0490029
4	767766,882275	9973921,617531	767768,668895	9973920,929464	0	0	0
5	767915,542316	9973976,871166	767916,180131	9973977,171527	0,0184115	0	0,0184115
6	767923,953398	9973989,538270	767924,355772	9973989,739260	-0,0662176	0	0,0662176
7	767837,433726	9973970,365326	767838,458621	9973970,051575	0	0	0
8	767747,796658	9973961,972580	767749,319436	9973960,875255	0,0105279	0	0,0105279

Total RMS Error: Forward:0,0495043

Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)

Forward Residual Unit: Unknown

Figura 66: RMS de la georeferenciación del mosaico Red



Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
1	767843,675177	9973862,025685	767845,514808	9973862,022171	0,0223914	0	0,0223914
2	767864,630328	9973902,440416	767865,960857	9973902,274637	-0,0803202	-0,18482	0,201519
3	767915,585008	9973976,931548	767916,180131	9973977,171527	0	0	0
4	767923,888573	9973989,443677	767924,355772	9973989,739260	0	0	0
5	767916,233432	9973920,237628	767917,290126	9973920,738181	0,0423871	0	0,0423871
6	767837,415709	9973970,530787	767838,458621	9973970,051575	0	0	0
7	767766,879227	9973921,704167	767768,668895	9973920,929464	0,0193206	0	0,0193206
8	767747,748859	9973962,012530	767749,319436	9973960,875255	0	0	0

Figura 67: RMS de la georeferenciación del mosaico NIR

- **Cálculo del índice NDVI a partir de ortomosaicos Red y NIR**

Mediante la herramienta *Raster Calculator* de *ArcGIS*, se calculó el índice NDVI con la Ecuación (1) y utilizando los ortomosaicos Red y NIR (véase Figura 68).

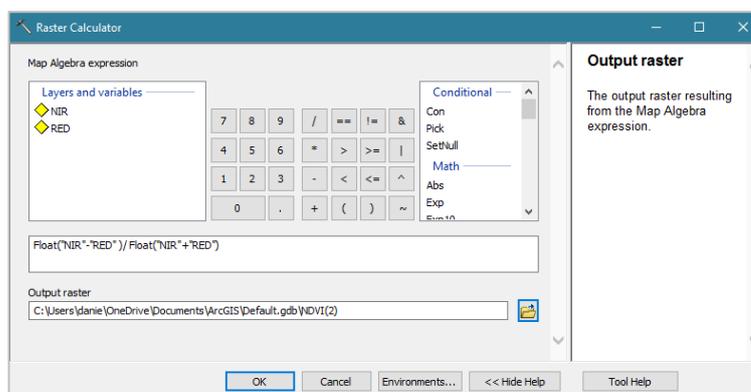


Figura 68: Cálculo de NDVI con *Raster Calculator* de *ArcGIS*

El mapa generado ($NDVI_2$) tiene valores de NDVI en cada uno de sus píxeles y se puede visualizarlo en el numeral 4.2.2 del capítulo 4.

3.3.2 NDVI mediante espectroradiómetro

En la Figura 69 se aprecia de manera general la metodología utilizada para la obtención de NDVI a partir de espectroradiómetro en el cultivo comercial.

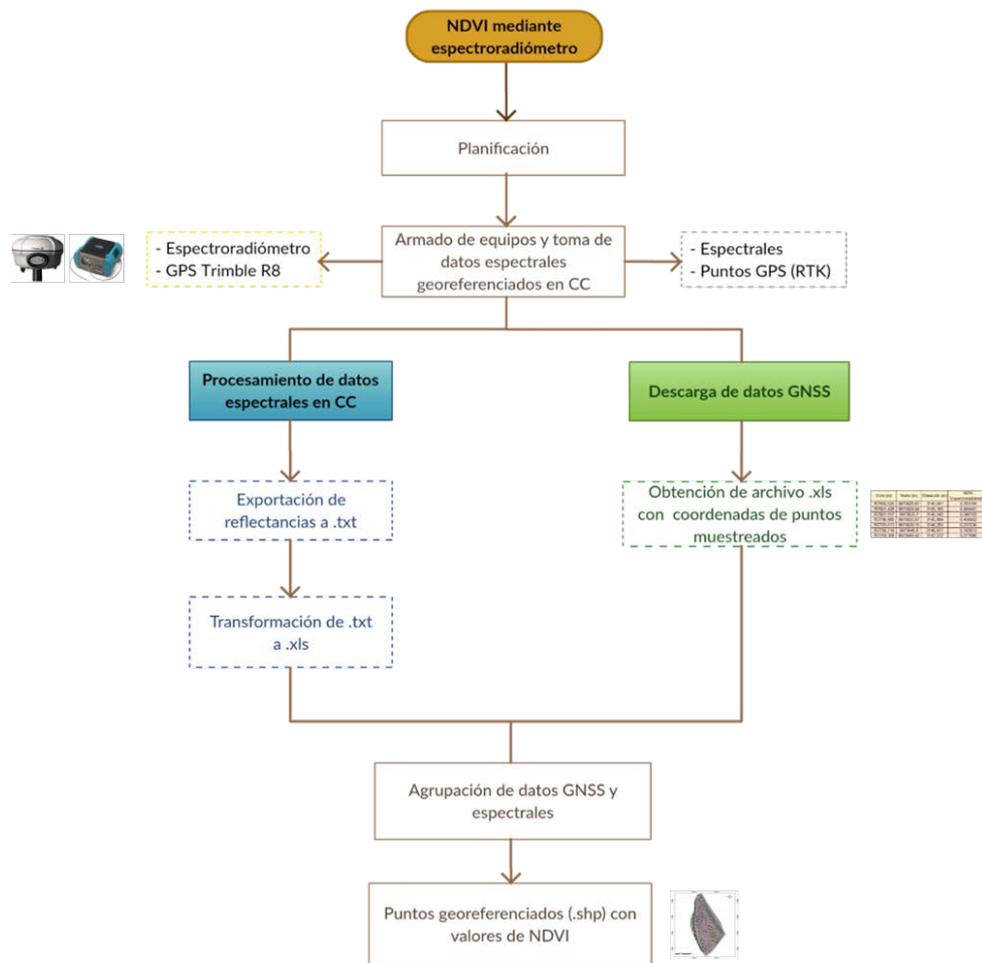


Figura 69: Diagrama de flujo para la obtención de NDVI mediante espectroradiómetro

- **Planificación**

Como paso previo, se realizó el cálculo del tamaño del pixel resultante del espectroradiómetro, con la finalidad de aproximar este valor al tamaño de pixel obtenido con la imagen del UAV. Al respecto, este cálculo se efectuó a partir de la siguiente ecuación:

$$x = 2h * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (17)$$

Esta ecuación se obtuvo mediante la resolución de triángulos rectángulos, como se ilustra en la Figura 70.

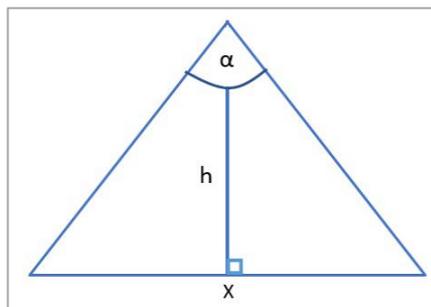


Figura 70: Triángulo utilizado para la obtención del tamaño del pixel

Donde:

h: altura del espectroradiómetro respecto a la quinua

α : IFOV del espectroradiómetro

x: tamaño de pixel

Debido a que el espectroradiómetro puede capturar información con IFOV de 1°, 8° y 25°; y que, además, las alturas de la toma de datos espectrales pueden variar con respecto a la planta, se calcularon diferentes tamaños de píxel, mostrados en la Tabla 19.

Tabla 19.

Cálculo del tamaño de píxel del espectroradiómetro

IFOV (°)/ h (cm)	20	25	30
1	0,35	0,44	0,52
8	2,80	3,50	4,20
25	8,87	11,08	13,30

Se eligió trabajar con el tamaño de pixel 11.08 cm, dado que es el más próximo al obtenido con UAV.

- **Armado de equipos y toma de datos espectrales georeferenciados en CC**

Se procedió al armado del espectroradiómetro, cuyo procedimiento se ilustra detalladamente en el Anexo 01. Además, se configuraron los equipos GPS; la base, sobre uno de los puntos de apoyo fotogramétrico, y el móvil.

En esta etapa, se ejecutó la toma de datos mediante el espectroradiómetro FieldSpec Hi Res 4 de 71 puntos distribuidos al azar en toda el área de estudio (véase numeral 4.2.3 del cap. 4), utilizando un IFOV de 25° y a una altura de 25 cm sobre la planta. A la par de este proceso, se posicionó la ubicación de cada punto con la ayuda del GPS Trimble R8, a través del método RTK. Finalmente, se realizó la descarga de la información de ambos equipos.

- **Procesamiento de datos espectrales en CC**

Se exportaron las reflectancias obtenidas del espectroradiómetro en formato *.txt* de los 71 datos obtenidos en campo (archivos *.asd*) a través del software *ViewSpec Pro* (véase Anexo 02), para luego ser guardados en formato *.xls*. Estos archivos contienen 72 columnas; la primera es la longitud de onda (Wavelength) y las 71 siguientes son las reflectancias de cada punto (ver ejemplo en la Figura 71).

Wavelength	1.mn	10.mn	11.mn	12.mn	13.mn	14.mn	15.mn
350	8,86E-03	6,08E-03	8,76E-03	0,01073627	1,30E-02	1,63E-02	7,87E-03
351	1,01E-02	6,25E-03	8,65E-03	1,13E-02	1,28E-02	1,62E-02	7,70E-03
352	9,40E-03	6,36E-03	8,71E-03	1,12E-02	1,24E-02	1,60E-02	7,68E-03
353	8,56E-03	6,17E-03	8,73E-03	1,10E-02	1,24E-02	0,01602919	7,53E-03
354	9,28E-03	5,81E-03	8,63E-03	1,13E-02	1,28E-02	1,65E-02	7,17E-03
355	8,90E-03	5,79E-03	8,12E-03	1,06E-02	1,35E-02	1,69E-02	7,44E-03

Figura 71: Ejemplo de la tabla de reflectancias de cada punto

Como se observa, los valores extraídos del equipo son muy pequeños, ya que no se encuentran expresados como porcentaje.

Posteriormente, mediante la Ecuación (2) (véase numeral 2.5.1 del cap. 2), se calculó el valor de NDVI para cada punto como se puede observar en la Figura 72.

Punto	1.mn	10.mn	11.mn	12.mn	13.mn	14.mn	15.mn
NDVI	0,52345815	0,24308681	0,64423709	0,52870381	0,25155598	0,5624651	0,70858071

Figura 72: Extracto de la tabla con los valores NDVI para cada punto

- **Descarga de datos GNSS**

Los datos del GPS Trimble R8 fueron descargados mediante el software *Trimble Business Center*, en donde se obtuvo un archivo *.xls* de las coordenadas de cada uno de los puntos muestreados. En la Figura 73 se aprecia un extracto de este archivo.

ID	Este (Metro)	Norte (Metro)	Elevación (Metro)
base1	767890,488	9973940,029	3146,604
lloa2	767800,5257	9973826,67	3145,041
lloa3	767801,4284	9973829,835	3145,165
lloa4	767801,557	9973833,696	3145,545

Figura 73: Extracto de la tabla con las coordenadas obtenidas para cada punto

- **Agrupación de datos GNSS y espectrales**

Esta etapa comprendió la agrupación de los valores NDVI del espectralradiómetro con sus respectivas coordenadas. Finalmente, se utilizó el software *ArcGIS* para la obtención de un archivo de puntos en formato *.shp* con esta información. En el numeral 4.2.3 del capítulo de Resultados se encuentra dicha tabla y la distribución espacial de los puntos muestreados.

3.3.3 Correlación de datos obtenidos

En la Figura 74 se explica la metodología que se siguió en este punto.

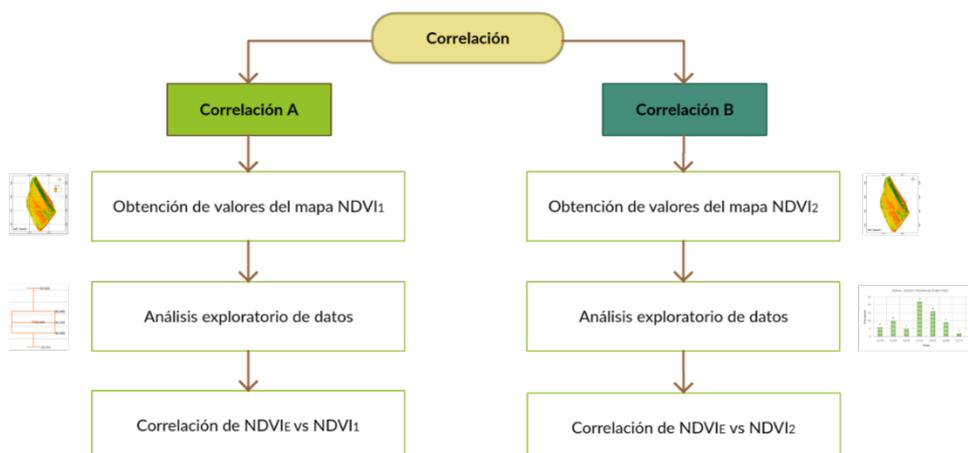


Figura 74: Metodología usada en la correlación de NDVI

Se realizaron dos correlaciones:

- Correlación A: NDVI obtenido del espectralradiómetro ($NDVI_E$) vs. NDVI obtenido del mapa generado automáticamente en *Pix4D* ($NDVI_1$).
- Correlación B: NDVI obtenido del espectralradiómetro ($NDVI_E$) vs. NDVI obtenido de los ortomosaicos Red y NIR ($NDVI_2$).

Para ambas correlaciones se siguieron los mismos pasos que se describen a continuación:

- **Obtención de valores del mapa NDVI**

Se extrajeron los píxeles (valores digitales) de cada mapa NDVI que coincidieron espacialmente con los puntos tomados en campo con el espectralradiómetro (archivo *.shp*). Para ello, se utilizó la herramienta *Sample* del software *ArcGIS*, la cual genera una tabla que incluye las coordenadas y los valores NDVI de los píxeles coincidentes. Posteriormente, esta tabla fue exportada a formato *.xls*.

- **Análisis exploratorio de datos**

El análisis exploratorio tiene por objetivo el describir los datos e identificar errores o inconsistencias mediante índices y gráficos. Este análisis se realizó para los tres grupos de datos obtenidos:

- Valores NDVI obtenidos con el espectroradiómetro (NDVI_E)
- Valores NDVI obtenidos a partir del raster generado automáticamente en *Pix4D* (NDVI₁)
- Valores NDVI obtenidos a partir de los ortomosaicos Red y NIR (NDVI₂).

Para ello, se obtuvieron algunas medidas estadísticas básicas, como: media, mediana, desviación estándar, varianza, coeficiente de asimetría, rango, máximo valor, mínimo valor y número de datos. Se construyeron histogramas para analizar gráficamente el comportamiento de los datos de acuerdo a su tendencia central, forma y dispersión. Además, se obtuvieron diagramas de caja, con el objetivo de analizar la distribución de datos mediante cuartiles y de identificar los valores atípicos.

Todos los gráficos antes mencionados, se realizaron en el programa *Microsoft Excel*, y se muestran en el numeral 4.2.4 del capítulo 4 con su respectivo análisis.

- **Correlación de NDVI**

Se elaboró una tabla en la que se agruparon los tres conjuntos de valores NDVI a correlacionar (NDVI_E, NDVI₁ y NDVI₂); la que se presenta en el punto 4.2.4 del capítulo de Resultados. Por último, se empleó la opción *Coefficiente de correlación* del módulo *Análisis de datos* de *Microsoft Excel*, la que permitió obtener los coeficientes de correlación de Pearson. Dichos valores y su discusión se encuentran detallados en el numeral 4.2.5 del capítulo de Resultados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados del Ensayo Controlado

De los muestreos realizados en el ensayo controlado se obtuvieron como resultados: una ecuación para cálculo de SAVI en base a reflectancias; valores de NDVI, CCI, SAVI, LAI y PAR analizados cada uno según tratamiento, repetición y estado fenológico; firmas espectrales en cada uno de los muestreos, ubicadas en el Anexo 03 con su respectivo análisis; y finalmente, gráficas comparativas de estos índices según tratamiento, repetición y estado fenológico para encontrar su relación entre sí.

4.1.1 *Resultados de la selección de la ecuación para cálculo de SAVI y su análisis estadístico*

En la Figura 75 se puede apreciar los valores de SAVI obtenidos, agrupados por tratamiento, repetición y datos del sensor utilizado.

TRATAMIENTO	REPETICION	SENSOR	SAVI
Control	I	RAPIDEYE	0.06015249
N100	I	RAPIDEYE	0.07267752
N200	I	RAPIDEYE	0.0764477
Control	II	RAPIDEYE	0.09412296
N100	II	RAPIDEYE	0.07140991
N200	II	RAPIDEYE	0.07945596
Control	III	RAPIDEYE	0.07572241
N100	III	RAPIDEYE	0.07772600
N200	III	RAPIDEYE	0.09365590
Control	IV	RAPIDEYE	0.07670697
N100	IV	RAPIDEYE	0.09282042
N200	IV	RAPIDEYE	0.10570754
Control	I	SPOT7	0.06577616
N100	I	SPOT7	0.07925116
N200	I	SPOT7	0.08307008
Control	II	SPOT7	0.10333599
N100	II	SPOT7	0.07783058
N200	II	SPOT7	0.08743571
Control	III	SPOT7	0.08306387
N100	III	SPOT7	0.08474458
N200	III	SPOT7	0.10176544
Control	IV	SPOT7	0.08409251
N100	IV	SPOT7	0.101811
N200	IV	SPOT7	0.11619833

CONTINÚA



Control	I	PLEIADES-IA	0.07334278
N100	I	PLEIADES-IA	0.08830134
N200	I	PLEIADES-IA	0.09183594
Control	II	PLEIADES-IA	0.11487219
N100	II	PLEIADES-IA	0.08571703
N200	II	PLEIADES-IA	0.09768726
Control	III	PLEIADES-IA	0.09222902
N100	III	PLEIADES-IA	0.09424526
N200	III	PLEIADES-IA	0.11238546
Control	IV	PLEIADES-IA	0.09341838
N100	IV	PLEIADES-IA	0.11386117
N200	IV	PLEIADES-IA	0.12920097

Figura 75: Resultados de valores SAVI por tratamiento, repetición y sensor

La Tabla 20 muestra los resultados del ADEVA realizado para el muestreo preliminar, donde *FV* son las Fuentes de Variación, *SC* es la Suma de Cuadrados, *gl* son los Grados de Libertad, *CM* son los Cuadrados Medios, *F* es el valor de tabla de la distribución de *F*, y el *p-valor* es el valor de *F* calculado en función de la significancia α , que en este caso es del 5% (véase apartado 2.8.1.1 del cap. 2).

Tabla 20.

ADEVA del muestreo preliminar

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
SENSOR	1,9E-03	2	9,3E-04	4,66	0,0165 *
Error	0,01	33	2,0E-04		
Total	0,01	35			

Se observa en la tabla anterior que existen diferencias significativas en los promedios de las bandas de los sensores analizados; lo cual se valida con el valor del estadístico p (menor a 0,05). Debido a estas diferencias, se realizó la prueba de Tukey, que se aprecia en la Tabla 21, donde *Medias* hace referencia a los valores promedios, *n* es el número de observaciones y *E.E.* es el Error Experimental.

Tabla 21.

Prueba de Tukey para sensores utilizados

SENSOR	Medias	n	E.E.		
RAPIDEYE	0,08	12	4,1E-03	A	
SPOT7	0,09	12	4,1E-03	A	B
PLEIADES-IA	0,10	12	4,1E-03		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

La prueba de Tukey clasificó a los sensores RapidEye y Pléiades-IA en dos categorías distintas (A y B); mientras que SPOT7 puede ubicarse en cualquiera de las dos. Esto se puede apreciar gráficamente en la Figura 76.

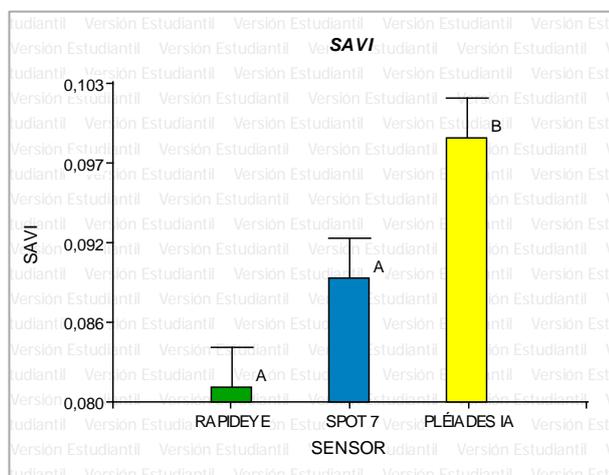


Figura 76: Resultados de la prueba de Tukey para sensores utilizados

Se eligió trabajar con los promedios de bandas de RapidEye (véase Ecuación 14 en el apartado 3.2.2.1 del cap. 3), la cual resultó con la media más baja; debido a que, al realizarse el muestreo sobre suelo desnudo, los valores para SAVI debían ser bajos (cerca de cero). Esto se corrobora con los resultados obtenidos por Gonzaga (2014), donde los valores de SAVI más bajos corresponden a suelo desnudo y los más altos a áreas con vegetación abundante.

4.1.2 Resultados de NDVI y su análisis estadístico

En cuanto al índice NDVI, en la Figura 77 se puede apreciar los valores obtenidos, los cuales han sido agrupados por tratamiento, repetición y estado fenológico.

MUESTREO	TRATAMIENTO	REPETICION	ESTADO	NDVI
1	Control	1	VEGETATIVO	0,11859265
	N100	1	VEGETATIVO	0,23686491
	N200	1	VEGETATIVO	0,40429751
	Control	2	VEGETATIVO	0,1990656
	N100	2	VEGETATIVO	0,45398992
	N200	2	VEGETATIVO	0,17280093
	Control	3	VEGETATIVO	0,36357959
	N100	3	VEGETATIVO	0,42821321
	N200	3	VEGETATIVO	0,38109607
	Control	4	VEGETATIVO	0,24913296
	N100	4	VEGETATIVO	0,39232674
	N200	4	VEGETATIVO	0,34174864
2	Control	1	RAMIFICACION	0,11859265
	N100	1	RAMIFICACION	0,39147985
	N200	1	RAMIFICACION	0,50728054
	Control	2	RAMIFICACION	0,37941812
	N100	2	RAMIFICACION	0,51649068
	N200	2	RAMIFICACION	0,34074972
	Control	3	RAMIFICACION	0,49878919
	N100	3	RAMIFICACION	0,49497468
	N200	3	RAMIFICACION	0,47256129
	Control	4	RAMIFICACION	0,43988502
	N100	4	RAMIFICACION	0,48903623
	N200	4	RAMIFICACION	0,48030144
3	Control	1	PANOJAMIENTO	0,39822627
	N100	1	PANOJAMIENTO	0,55921957
	N200	1	PANOJAMIENTO	0,64847808
	Control	2	PANOJAMIENTO	0,53121885
	N100	2	PANOJAMIENTO	0,61825316
	N200	2	PANOJAMIENTO	0,52705179
	Control	3	PANOJAMIENTO	0,59097787
	N100	3	PANOJAMIENTO	0,65232882
	N200	3	PANOJAMIENTO	0,61679128
	Control	4	PANOJAMIENTO	0,58116793
	N100	4	PANOJAMIENTO	0,64433550
	N200	4	PANOJAMIENTO	0,63061799

Figura 77: Resultados de valores NDVI por tratamiento, repetición y estado fenológico

En la Tabla 22 se observa diferencias significativas en las 3 variables analizadas ($p < 0.05$). Por lo tanto, se procedió a las pruebas de Tukey para cada una de ellas y a su interpretación.

Tabla 22.

ADEVA para NDVI

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
TRATAMIENTO	0,09	2	0,04	7,84	0,0020	*
REPETICION	0,08	3	0,03	4,90	0,0073	*
ESTADO	0,45	2	0,22	38,97	<0,0001	*
Error	0,16	28	0,01			
Total	0,78	35				

4.1.2.1 Análisis de NDVI según tratamientos

La prueba de Tukey en la Tabla 23, indica que el valor para Control se encuentra en un rango (A), mientras que los valores para N100 y N200 se encuentran en un rango diferente (B), lo cual también se aprecia en la Figura 78. Esto indica que espectralmente se puede diferenciar entre una planta de quinua sin fertilizante y una con fertilización nitrogenada; sin embargo, no se puede distinguir entre dosis (N100 y N200), ya que estadísticamente son iguales.

Tabla 23.

Prueba de Tukey para NDVI según tratamiento

TRATAMIENTO	Medias	n	E. E.	
Control	0,37	12	0,02	A
N200	0,46	12	0,02	B
N100	0,49	12	0,02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

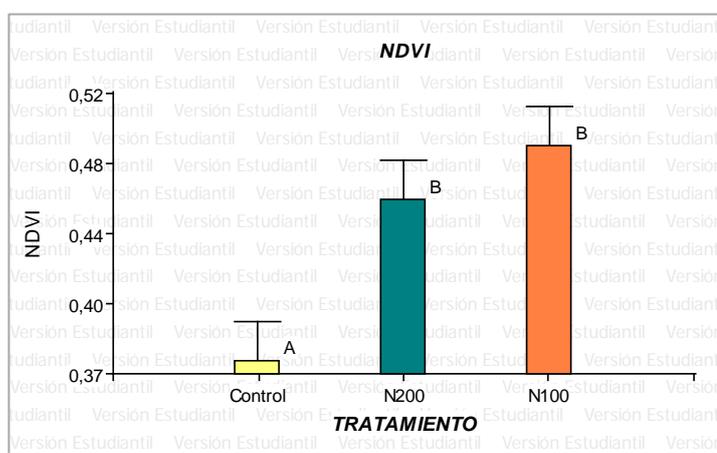


Figura 78: Resultados de la prueba de Tukey para NDVI según tratamiento

Analizando las medias de cada tratamiento se observa que el NDVI aumenta de 0.37 en Control a 0.49 en N100; esto debido a que el consumo del nitrógeno, según CARE (2015), está involucrado en los principales procesos de desarrollo de la planta. Erley et. al (2005), en su estudio del rendimiento de la quinua a diferentes dosis de nitrógeno (0, 80, 120 kg.h⁻¹), obtuvieron como resultado que la quinua respondió fuertemente al nitrógeno, obteniendo mayor producción de grano y no se vio afectada con el aumento de las dosis de este elemento. El valor del índice debería aumentar de

N100 a N200 según lo dicho anteriormente; no obstante, se evidencia un descenso, lo cual concuerda con lo obtenido por Huancahuari (2004) citado por CARE (2015), quién sugiere no utilizar valores por encima de $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N, debido a que el exceso produjo una disminución de los rendimientos en la quinua que analizó.

4.1.2.2 Análisis de NDVI según repeticiones

En la prueba de Tukey para las repeticiones que se muestra en la Tabla 24, se observa que las repeticiones 1, 2 y 4 tienen un comportamiento similar, por lo que les corresponde un mismo rango (A); por otro lado, las repeticiones 2, 3 y 4 también tienen comportamientos similares, agrupándose en un mismo rango (B), lo cual también se aprecia en la Figura 79. Por lo tanto, se divide una clara diferencia entre las repeticiones 1 y 3; esto puede deberse a una heterogeneidad en el manejo agronómico de cada una; entendiéndose por manejo agronómico al conjunto de labores agrícolas que se realizan a lo largo del desarrollo del cultivo como raleo, riego, aporque, entre otras. Esto fue evaluado a través de un registro fotográfico de acuerdo al espaciado existente entre plantas y uniformidad en el crecimiento, tal como se puede apreciar en las imágenes del Anexo 08.

Tabla 24.

Prueba de Tukey para NDVI según repetición

REPETICION	Medias	n	E.E.		
1,00	0,38	9	0,03	A	
2,00	0,42	9	0,03	A	B
4,00	0,47	9	0,03	A	B
3,00	0,50	9	0,03		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

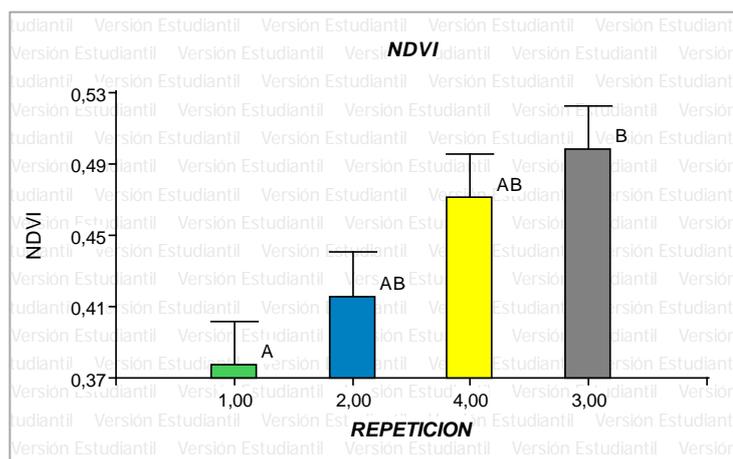


Figura 79: Resultados de la prueba de Tukey para NDVI según repetición

4.1.2.3 Análisis de NDVI según estados fenológicos

En la Tabla 25 que corresponde a la prueba de Tukey según estado fenológico, se observa claramente que los tres estados analizados se encuentran en diferentes rangos, como se visualiza en la Figura 80; lo que permite deducir que, espectralmente se puede diferenciar a la quinua por estados fenológicos. Además, analizando los valores de las medias de NDVI, se divisa que van en aumento para cada estado, lo que se debe al crecimiento y desarrollo de la planta; esto coincide con lo obtenido por Hidalgo et. al (2016) quienes encontraron una tendencia de crecimiento similar entre el desarrollo vegetativo y el NDVI.

Tabla 25.

Prueba de Tukey para NDVI según estado fenológico

ESTADO	Medias	n	E.E.	
VEGETATIVO	0,31	12	0,02	A
RAMIFICACION	0,43	12	0,02	B
PANOJAMIENTO	0,58	12	0,02	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

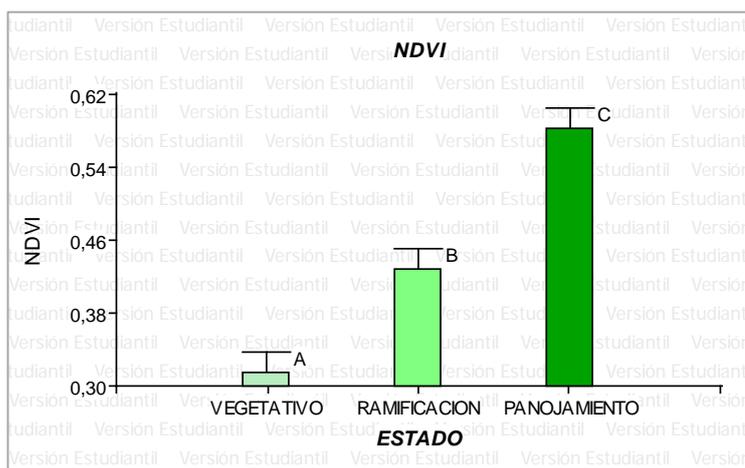


Figura 80: Resultados de la prueba de Tukey para NDVI según estado fenológico

4.1.3 *Resultados de CCI y su análisis estadístico*

En la Figura 81 se observa los valores de CCI agrupados por tratamiento, repetición y estado fenológico.

MUESTREO	TRATAMIENTO	REPETICION	ESTADO	CCI
1	Control	1	VEGETATIVO	0,83909443
	N100	1	VEGETATIVO	0,83809934
	N200	1	VEGETATIVO	1,21197755
	Control	2	VEGETATIVO	0,91909192
	N100	2	VEGETATIVO	1,1871762
	N200	2	VEGETATIVO	0,9915016
	Control	3	VEGETATIVO	1,07048321
	N100	3	VEGETATIVO	1,12403104
	N200	3	VEGETATIVO	1,18563833
	Control	4	VEGETATIVO	0,89456008
	N100	4	VEGETATIVO	1,01733568
	N200	4	VEGETATIVO	1,02612813
2	Control	1	RAMIFICACION	0,89819816
	N100	1	RAMIFICACION	1,17990023
	N200	1	RAMIFICACION	1,49364818
	Control	2	RAMIFICACION	1,15465039
	N100	2	RAMIFICACION	1,48397308
	N200	2	RAMIFICACION	1,07870710
	Control	3	RAMIFICACION	1,27284669
	N100	3	RAMIFICACION	1,40183226
	N200	3	RAMIFICACION	1,30423626
	Control	4	RAMIFICACION	1,12753334
	N100	4	RAMIFICACION	1,31687193
	N200	4	RAMIFICACION	1,30530292

CONTINÚA

3	Control	1	PANOJAMIENTO	1,23306958
	N100	1	PANOJAMIENTO	1,66084378
	N200	1	PANOJAMIENTO	2,10045808
	Control	2	PANOJAMIENTO	1,48338492
	N100	2	PANOJAMIENTO	1,82961328
	N200	2	PANOJAMIENTO	1,57565615
	Control	3	PANOJAMIENTO	1,64335030
	N100	3	PANOJAMIENTO	1,99376226
	N200	3	PANOJAMIENTO	1,81604512
	Control	4	PANOJAMIENTO	1,59291740
	N100	4	PANOJAMIENTO	1,95197043
	N200	4	PANOJAMIENTO	1,82095481

Figura 81: Resultados de valores CCI por tratamiento, repetición y estado fenológico

En la Tabla 26, el ADEVA para este índice muestra diferencias significativas para las fuentes analizadas, dado que el valor de p es menor a 0.05. Se procedió a las pruebas de Tukey para obtener rangos de significancia.

Tabla 26.

ADEVA para CCI

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
TRATAMIENTO	0,44	2	0,22	10,07	0,0005 *
REPETICION	0,12	3	0,04	1,77	0,1762
ESTADO	3,06	2	1,53	69,76	<0,0001 *
Error	0,61	28	0,02		
Total	4,23	35			

4.1.3.1 Análisis de CCI según tratamientos

La clorofila es un pigmento de color verde que desempeña un papel esencial en el proceso de fotosíntesis de las plantas, en cuya estructura se encuentran átomos de nitrógeno, entre otros elementos (Allinger, y otros, 1971). Es por esto que existe una estrecha relación entre el contenido de nitrógeno y la clorofila de las plantas, ya que, al incrementarse el nitrógeno, la clorofila también lo hace de manera proporcional (Gholizadeh, Amin, Anuar, & Aimrun, 2009) hasta cierto punto. Con estos antecedentes, se observa un incremento en el índice de clorofila calculado de Control a N100, tal como se muestra en la Tabla 27; lo que también se corrobora con lo concluido por Rodríguez et. al (1998), quienes encontraron una tendencia a aumentar la concentración de clorofila en tomate mientras se incrementa el contenido de

nitrógeno; al igual que Debata & Murty (1983), quienes demostraron que el nitrógeno retrasa la pérdida de clorofila. Sin embargo, se observa una leve disminución en el índice al aumentar la dosis de nitrógeno a 200 Kg/Ha, lo cual concuerda con lo expuesto anteriormente en el análisis de NDVI: las dosis superiores a los 120 Kg/Ha en quinua perjudican el desarrollo de la planta, reflejándose en este caso, en el contenido de clorofila. En cuanto a los rangos obtenidos por la prueba de Tukey al 5% de la Tabla 27, se observa que el Control se ubica en el rango A, mientras que N100 y N200 se ubican en el rango B; confirmando de igual manera lo obtenido en NDVI: se puede diferenciar espectralmente a quinua con o sin dosis de nitrógeno, pero en este caso, utilizando como base índices que evalúen el contenido de clorofila de la planta. Estos resultados se pueden apreciar gráficamente en la Figura 82.

Tabla 27.

Prueba de Tukey para CCI según tratamiento

TRATAMIENTO	Medias	n	E. E.	
Control	1,18	12	0,04	A
N200	1,41	12	0,04	B
N100	1,42	12	0,04	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

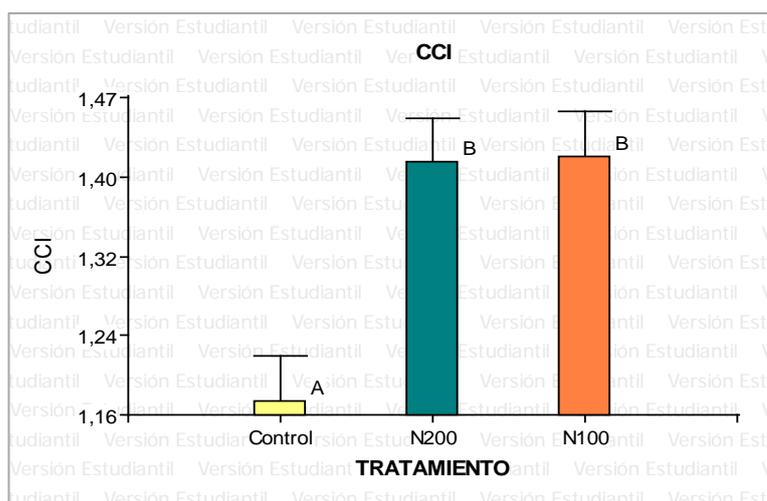


Figura 82: Resultados de la prueba de Tukey para CCI según tratamiento

4.1.3.2 Análisis de CCI según repeticiones

Al no existir diferencias significativas (véase Tabla 26), la prueba de Tukey en la Tabla 28 muestra que todas las repeticiones se encuentran en el mismo rango. También se confirma lo obtenido en NDVI en cuanto a la media más baja, que corresponde a la repetición 1 que, de acuerdo al Anexo 08 (Anexo fotográfico), es la repetición con el manejo más pobre, evidenciándose en espacios vacíos considerables entre plantas y retrasos en etapas fenológicas.

Tabla 28.

Prueba de Tukey para CCI según repetición

REPETICION	Medias	n	E. E.	
1,00	1,27	9	0,05	A
2,00	1,30	9	0,05	A
4,00	1,34	9	0,05	A
3,00	1,42	9	0,05	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

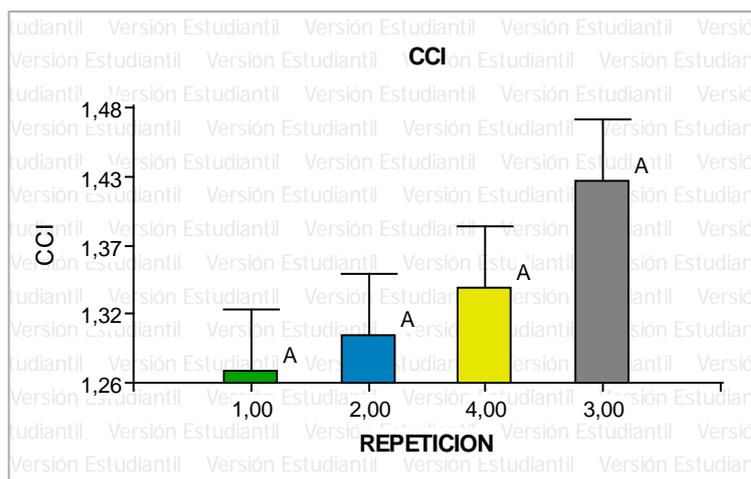


Figura 83: Resultados de la prueba de Tukey para CCI según repetición

4.1.3.3 Análisis de CCI según estados fenológicos

La prueba de Tukey de la Tabla 29 da como resultado diferentes rangos para cada uno de los estados evaluados; lo que significa que mediante el CCI, al igual que con NDVI, se puede diferenciar espectralmente los estados fenológicos de la quinua, pero en este caso, usando el rango del espectro electromagnético en el que las plantas tienen su

curva de sensibilidad a la fotosíntesis, y por ende, donde tiene lugar la acción de la clorofila. Según lo muestra la Figura 84, el CCI se incrementa a medida que la planta va creciendo; resultados similares encontró Argenta et. al (2001) al evaluar clorofila en algunos estados de maíz.

Tabla 29.

Prueba de Tukey para CCI según estado fenológico

ESTADO	Medias	n	E.E.	
VEGETATIVO	1,03	12	0,04	A
RAMIFICACION	1,25	12	0,04	B
PANOJAMIENTO	1,73	12	0,04	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

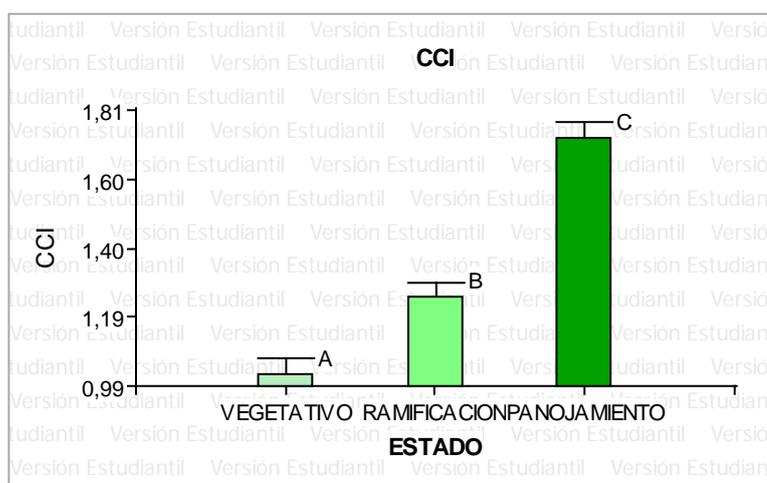


Figura 84: Resultados de la prueba de Tukey para CCI según estado fenológico

4.1.4 Resultados de SAVI y su análisis estadístico

En cuanto al índice SAVI, en la Figura 85 se puede apreciar los valores obtenidos, los cuales han sido agrupados por tratamiento, repetición y estado fenológico.

MUESTREO	TRATAMIENTO	REPETICION	ESTADO	SAVI
1	Control	1	VEGETATIVO	0,16129848
	N100	1	VEGETATIVO	0,37152464
	N200	1	VEGETATIVO	0,5019938
	Control	2	VEGETATIVO	0,29105546
	N100	2	VEGETATIVO	0,39582092
	N200	2	VEGETATIVO	0,15116669
	Control	3	VEGETATIVO	0,3744772
	N100	3	VEGETATIVO	0,54936607
	N200	3	VEGETATIVO	0,41591695
	Control	4	VEGETATIVO	0,3193712
	N100	4	VEGETATIVO	0,41879865
	N200	4	VEGETATIVO	0,31889613
2	Control	1	RAMIFICACION	0,16129848
	N100	1	RAMIFICACION	0,45504249
	N200	1	RAMIFICACION	0,59606851
	Control	2	RAMIFICACION	0,41072488
	N100	2	RAMIFICACION	0,62155551
	N200	2	RAMIFICACION	0,27341657
	Control	3	RAMIFICACION	0,53230625
	N100	3	RAMIFICACION	0,62011086
	N200	3	RAMIFICACION	0,48178730
	Control	4	RAMIFICACION	0,47596948
	N100	4	RAMIFICACION	0,59301391
	N200	4	RAMIFICACION	0,59175855
3	Control	1	PANOJAMIENTO	0,49717504
	N100	1	PANOJAMIENTO	0,69371822
	N200	1	PANOJAMIENTO	0,75189137
	Control	2	PANOJAMIENTO	0,73014166
	N100	2	PANOJAMIENTO	0,84593124
	N200	2	PANOJAMIENTO	0,70778643
	Control	3	PANOJAMIENTO	0,78245911
	N100	3	PANOJAMIENTO	0,78569993
	N200	3	PANOJAMIENTO	0,79718679
	Control	4	PANOJAMIENTO	0,73581721
	N100	4	PANOJAMIENTO	0,83507520
	N200	4	PANOJAMIENTO	0,84432445

Figura 85: Resultados de valores SAVI según tratamiento, repetición y estado fenológico

La Tabla 30 muestra la existencia de diferencias significativas en las 3 variables analizadas, dado que el valor de p es menor a 0.05. Por lo tanto, se procedió a las pruebas de Tukey para cada una de ellas y a su interpretación.

Tabla 30.

ADEVA para SAVI

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
TRATAMIENTO	0,12	2	0,06	6,59	0,0045	*
REPETICION	0,10	3	0,03	3,61	0,0254	*
ESTADO	0,97	2	0,49	52,16	<0,0001	*
Error	0,26	28	0,01			
Total	1,46	35				

4.1.4.1 Análisis de SAVI según tratamientos

La prueba de Tukey en la Tabla 31, muestra que los valores de SAVI para Control y N100 se encuentran en diferentes rangos, mientras que N200 podría comportarse como cualquiera de las dos, lo que se puede apreciar en la Figura 86. La diferencia existente entre 0 y 100 Kg/Ha permite deducir que mientras mayor dosis de fertilización se use, la quinua tiene un mayor desarrollo en cuanto a masa vegetal, comprobado con el aumento del valor de SAVI (de 0.46 a 0.60). Esto coincide con lo descrito por Berti et al. (2000), quienes encontraron una tendencia de la quinua a acumular mayor masa vegetal a medida que aumenta la fertilización. Sin embargo, se observa que para 200 Kg/Ha hay una disminución de SAVI, lo cual se pudo haber debido a una reducción de masa vegetal por efecto del exceso de N, lo cual posteriormente se evidenciará en descenso de rendimiento del grano; otra razón podría ser que en las primeras etapas de desarrollo de la quinua, se observa mayores espacios entre plantas para las parcelas N200, comprobado con fotografías (véase Anexo 08).

Tabla 31.

Prueba de Tukey para SAVI según tratamiento

TRATAMIENTO	Medias	n	E. E.		
Control	0,46	12	0,03	A	
N200	0,54	12	0,03	A	B
N100	0,60	12	0,03		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

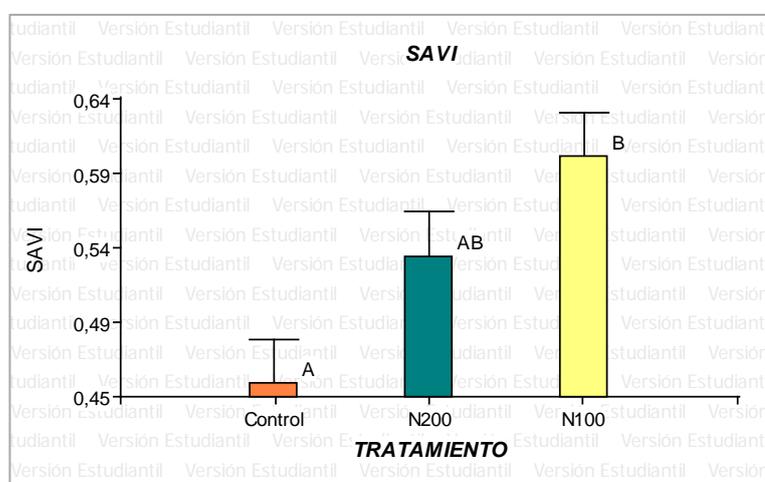


Figura 86: Resultados de la prueba de Tukey para SAVI según tratamiento

4.1.4.2 Análisis de SAVI según repeticiones

Al igual que en NDVI, se observa un mismo rango para las repeticiones 1, 2 y 4 (A) y otro diferente para 2, 4 y 3 (B). De la misma forma se evidencia una clara diferencia entre la repetición 1 y 3 en la Tabla 32, que pueden ser sustentadas por los registros fotográficos llevados durante los muestreos realizados en los que, por ejemplo, en el segundo muestreo, la parcela N100 de la primera repetición posee mayor espacio entre plantas que la N100 de la tercera repetición (véase Anexo 08). Al tener mayor espacio, posee un SAVI más bajo, ya que al momento del muestreo las lecturas comprenden más porciones de suelo que la de la tercera repetición, la cual por ende tendrá un SAVI más alto por la reducción de la distancia entre plantas. En resumen, las diferencias entre repeticiones vienen dadas por las actividades agronómicas, lo que se aprecia en la Figura 87.

Tabla 32.

Prueba de Tukey para SAVI según repetición

REPETICION	Medias	n	E. E.		
1,00	0,47	9	0,03	A	
2,00	0,49	9	0,03	A	B
4,00	0,57	9	0,03	A	B
3,00	0,59	9	0,03		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

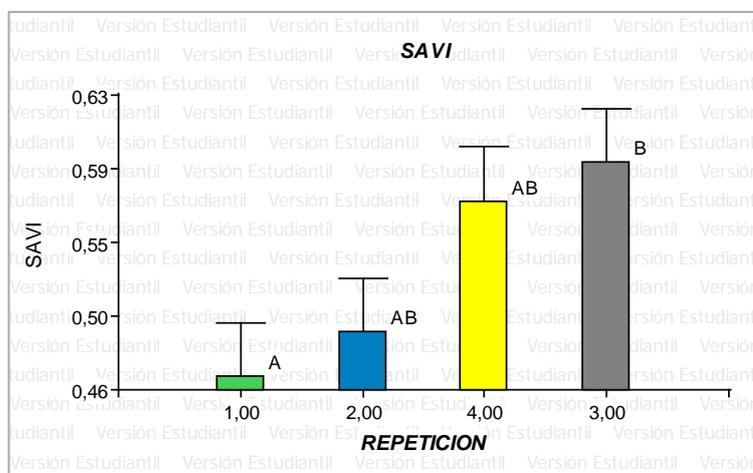


Figura 87: Resultados de la prueba de Tukey para SAVI según repetición

4.1.4.3 Análisis de SAVI según estados fenológicos

Al cambiar de estado fenológico, se esperaría de manera lógica que la planta crezca en tamaño y, por ende, en masa vegetal. Como se ha señalado anteriormente, SAVI tendrá sus valores más bajos cuando se trate suelo desnudo o una planta con poca masa vegetal; mientras que sus valores más altos indican una densidad considerable de vegetación. Esto se evidencia claramente en los resultados de la prueba de Tukey en la Tabla 33 y en la Figura 88, en donde se observa que los 3 estados fenológicos analizados se ubican en diferentes rangos; lo cual permite deducir que es posible diferenciar los estados fenológicos de la quinua mediante datos espectrales, ratificando los resultados obtenidos para NDVI y CCI en el apartado 4.1.2 y 4.1.3 de este capítulo.

Tabla 33.

Prueba de Tukey para SAVI según estado fenológico

ESTADO	Medias	n	E.E.	
VEGETATIVO	0,36	12	0,03	A
RAMIFICACION	0,48	12	0,03	B
PANOJAMIENTO	0,75	12	0,03	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

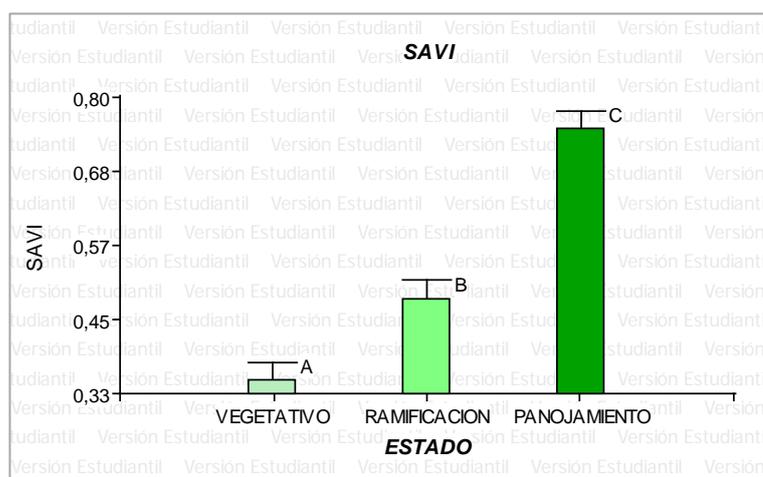


Figura 88: Resultados de la prueba de Tukey para SAVI según estado fenológico

4.1.5 Resultados de la relación entre índices de vegetación

A continuación, se presentan gráficas construidas a partir de los promedios de los índices obtenidos, agrupados por los criterios de dosis de fertilización, repetición y estado fenológico.

La Figura 89 muestra los valores de los índices NDVI, CCI y SAVI promediados por cada uno de los tratamientos analizados (Control, N100 y N200) en todos los muestreos y repeticiones. Como se observa, los tres índices tienen curvas con la misma tendencia: de Control a N100 aumentan y luego para N200 disminuyen. Además, se percibe que la curva de CCI se encuentra sobre los otros dos debido a la diferencia de escalas entre los índices: NDVI y SAVI trabajan entre 0 y 1, mientras que CCI se encuentra entre 0,5 y 1; sin embargo, poseen el mismo comportamiento. Es así que se demuestra de una manera visual lo expuesto en los apartados 4.1.2 y 4.1.3 respecto al tema de fertilización en quinua.

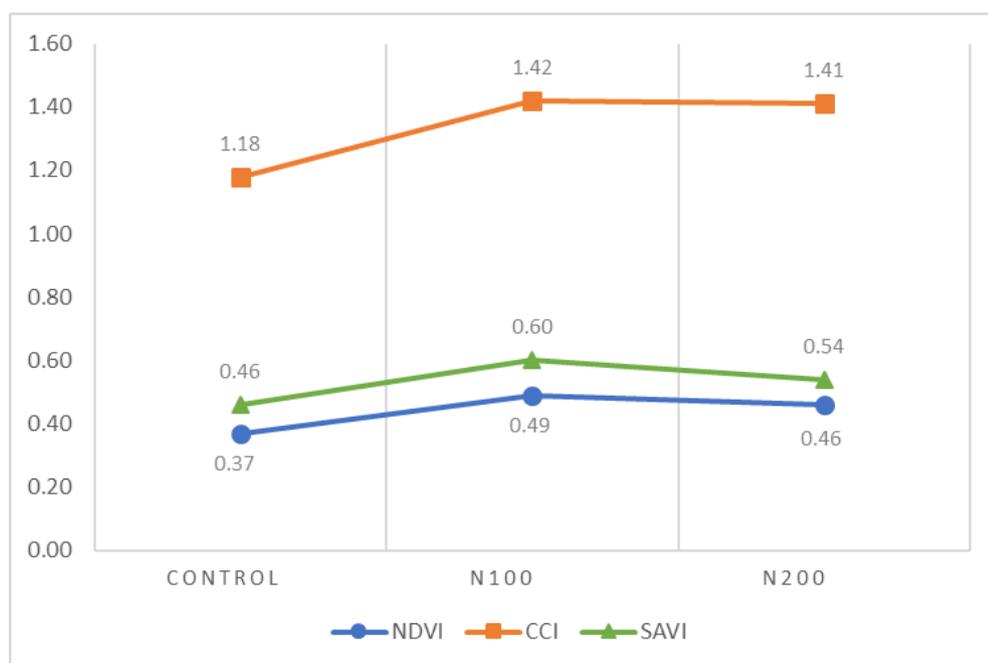


Figura 89: Índices de vegetación vs. dosis de fertilización

La Figura 90 muestra los índices de vegetación en relación a las repeticiones o bloques estudiados en el ensayo controlado. Igualmente, se observa una tendencia parecida en las tres curvas: entre I y II se mantienen los valores, de II a III aumentan

y de III a IV disminuyen. Cabe aclarar que las diferencias entre bloques se dan por el manejo agronómico que tuvieron cada una de ellas, sin que esto resulte significativo en los resultados finales.

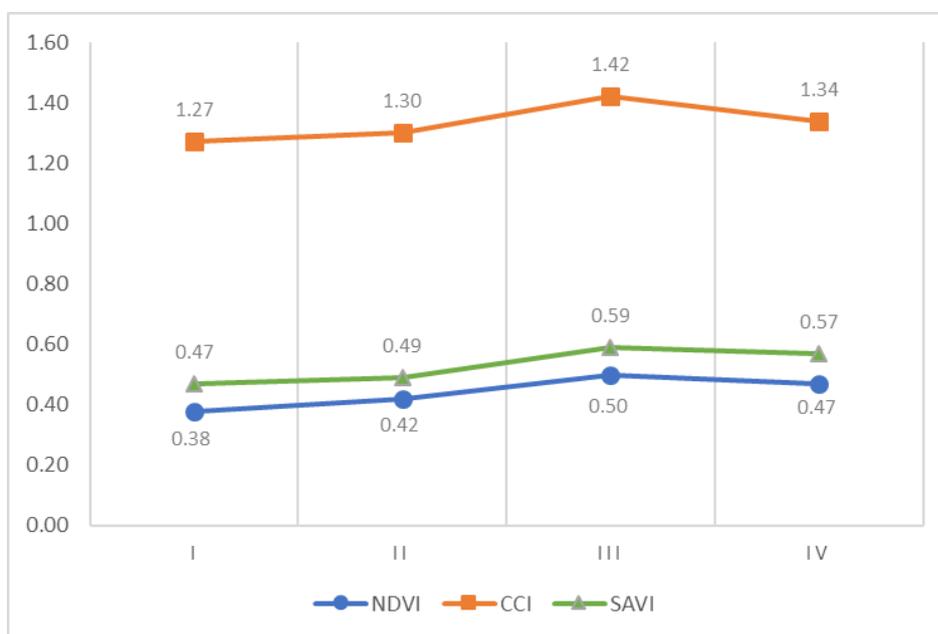


Figura 90: Índices de vegetación vs. Repeticiones

Por último, la Figura 91 presenta las curvas con los promedios de los tres índices en base a los estados fenológicos de la quinua. Se continúa observando que entre los tres índices existe la misma tendencia: de ciclo vegetativo a ramificación existe un aumento, y de ramificación a panojamiento igualmente aumenta, pero de forma más notoria. Estos incrementos se deben al crecimiento y desarrollo de la planta.

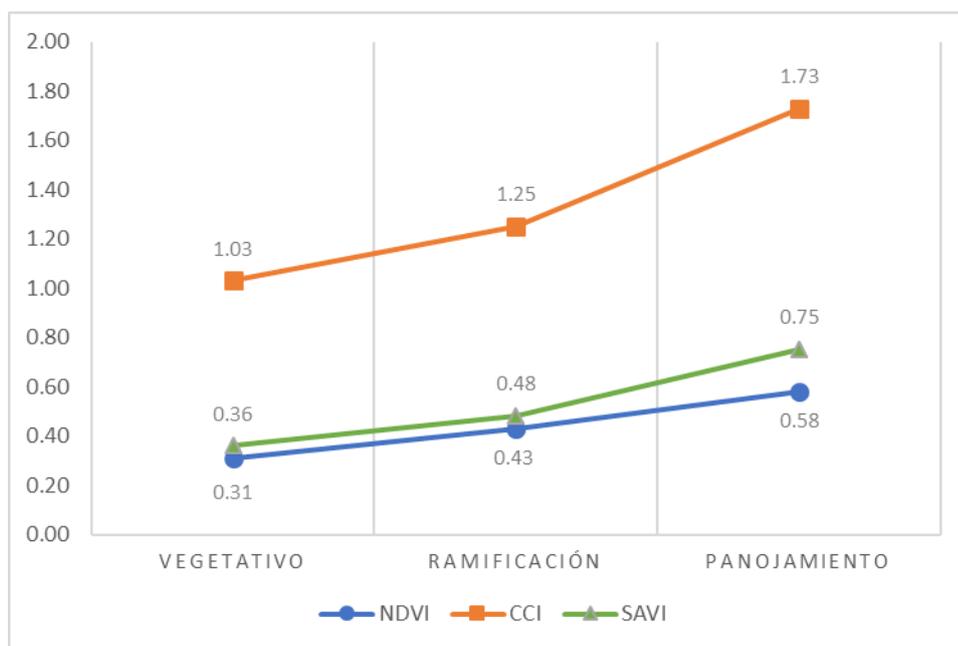


Figura 91: Índices de vegetación vs. estados fenológicos

4.1.6 Resultados de LAI y PAR y su análisis estadístico

En la Figura 92 se puede apreciar los valores obtenidos para los índices LAI y PAR agrupados por tratamiento, repetición y estado fenológico.

MUESTREO	TRATAMIENTO	REPETICION	ESTADO	LAI	PAR
2	Control	1	RAMIFICACION	1,00207892	791,045833
	N100	1	RAMIFICACION	2,23187916	344,541667
	N200	1	RAMIFICACION	1,18240539	704,545833
	Control	2	RAMIFICACION	1,50155978	646,687500
	N100	2	RAMIFICACION	1,61933163	655,416667
	N200	2	RAMIFICACION	1,01543858	976,387500
	Control	3	RAMIFICACION	2,37614671	370,629167
	N100	3	RAMIFICACION	3,80937553	150,925000
	N200	3	RAMIFICACION	3,38362661	202,129167
	Control	4	RAMIFICACION	4,10883223	139,270833
	N100	4	RAMIFICACION	2,05485514	532,541667
	N200	4	RAMIFICACION	3,80893110	190,954167
3	Control	1	PANOJAMIENTO	1,10829849	796,037500
	N100	1	PANOJAMIENTO	3,16896588	139,491667
	N200	1	PANOJAMIENTO	1,72749208	454,962500
	Control	2	PANOJAMIENTO	0,82072150	1026,662500
	N100	2	PANOJAMIENTO	2,00321458	362,504167
	N200	2	PANOJAMIENTO	1,42916356	550,391667
	Control	3	PANOJAMIENTO	1,22870024	615,320833
	N100	3	PANOJAMIENTO	3,23691990	172,637500
	N200	3	PANOJAMIENTO	1,81612927	550,391667
	Control	4	PANOJAMIENTO	2,07321652	454,350000
	N100	4	PANOJAMIENTO	2,50625877	340,858333
	N200	4	PANOJAMIENTO	2,51651629	363,800000

Figura 92: Resultados de valores LAI y PAR según tratamiento, repetición y estado fenológico

La Tabla 34 muestra el ADEVA para LAI, en donde se aprecia significancia estadística únicamente para repetición ($\rho < 0.05$). En cuanto a PAR, se observa en la Tabla 35 que estadísticamente hay diferencias para tratamiento y repetición; aunque el ρ valor para tratamiento es apenas mayor a 0.05, se considera significativo de igual forma y se corrobora en la prueba de Tukey.

Tabla 34.

ADEVA para LAI

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
TRATAMIENTO	2,59	2	1,30	2,20	0,1410
REPETICION	8,76	3	2,92	4,96	0,0118 *
ESTADO	0,83	1	0,83	1,41	0,2519
Error	10,01	17	0,59		
Total	22,19	23			

Tabla 35.

ADEVA para PAR

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
TRATAMIENTO	290701,13	2	145350,56	3,47	0,0543 *
REPETICION	553149,39	3	184383,13	4,41	0,0182 *
ESTADO	623,56	1	623,56	0,01	0,9043
Error	711175,87	17	41833,87		
Total	1555649,95	23			

Los análisis para tratamiento, repetición y estado fenológico se realizaron tomando en cuenta ambos índices y no por separado, debido a la relación que presentan entre sí.

4.1.6.1 Análisis de LAI y PAR según tratamientos

Al realizar la prueba de Tukey al 5% para tratamientos, se observa el mismo rango para LAI (véase Tabla 36), lo cual quiere decir que no existen diferencias estadísticas en el área foliar entre tratamientos. En tanto que, para PAR, se muestra diferencias entre Control y N100, puesto que se ubican en rangos diferentes y N200 puede comportarse como Control o como N100 (véase Tabla 37), lo que se visualiza gráficamente en la Figura 93.

Tabla 36.**Prueba de Tukey para LAI según tratamiento**

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
Control	1,78	8	0,27	A
N200	2,11	8	0,27	A
N100	2,58	8	0,27	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 37.**Prueba de Tukey para PAR según tratamiento**

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
N100	337,36	8	72,31	A	
N200	499,20	8	72,31	A	B
Control	605,00	8	72,31		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

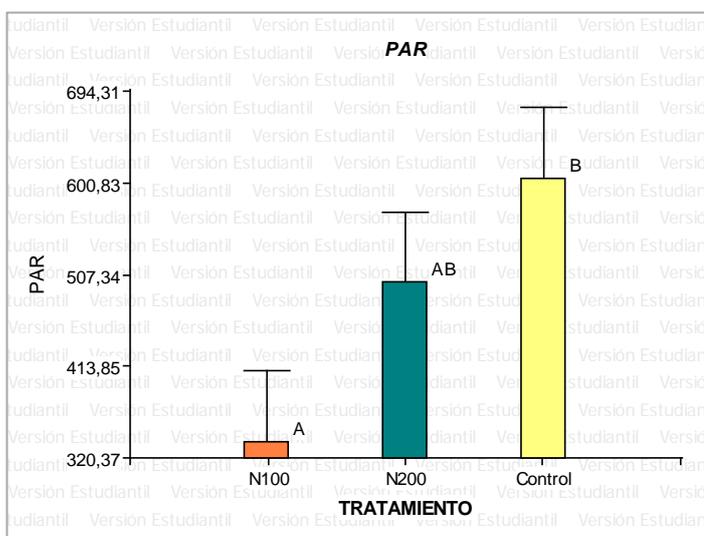


Figura 93: Resultados de la prueba de Tukey para PAR según tratamiento

Analizando los valores de las medias para ambos índices, se observan diferencias numéricas: mientras LAI aumenta de Control a N100, PAR disminuye; lo cual es coincidente con lo encontrado por Trejo et. al (2006), quienes evaluaron el efecto de la densidad y estructura de las hojas de maíz en la penetración de la radiación solar fotosintéticamente activa y como resultados obtuvieron que a mayor densidad de plantas hay menor penetración de radiación y, por lo tanto, menor PAR. Esto quiere

decir que mientras el área foliar aumenta, existirá una mayor densidad vegetal, lo que permitirá menos paso de radiación hacia las partes más bajas de la planta y el suelo.

También se puede ver que el valor de LAI de N100 a N200 baja y PAR aumenta; con lo cual se confirma que al aumentar la dosis de nitrógeno en quinua (mayores a 120 Kg/Ha) no se conseguirá mayor desarrollo de la planta. Al ser N100 la dosis más aproximada a la óptima recomendada en bibliografía, es verificable con el valor de LAI que en esta dosis viene a ser el más alto; y por ende, en PAR es el más bajo.

4.1.6.2 Análisis de LAI y PAR según repeticiones

La Tabla 38 muestra la prueba de Tukey para LAI según repetición, en donde se observan comportamientos similares en las repeticiones 1 y 3; mientras que existen diferencias para la segunda y cuarta repetición (véase Figura 94). Se observa un comportamiento parecido en PAR (véase Tabla 39), donde en el rango A se encuentran las repeticiones 1, 3 y 4; en tanto que en el rango B se ubican las repeticiones 1 y 2, lo que se ilustra en la Figura 95. Estas diferencias, al igual que para los índices anteriormente analizados, se deben al manejo agronómico que fue llevado a cabo.

Tabla 38.

Prueba de Tukey para LAI según repetición

REPETICION	Medias	n	E.E.		
2,00	1,40	6	0,31	A	
1,00	1,74	6	0,31	A	B
3,00	2,64	6	0,31	A	B
4,00	2,84	6	0,31		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 39.

Prueba de Tukey para PAR según repetición

REPETICION	Medias	n	E.E.		
4,00	336,96	6	83,50	A	
3,00	343,67	6	83,50	A	
1,00	538,44	6	83,50	A	B
2,00	703,01	6	83,50		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

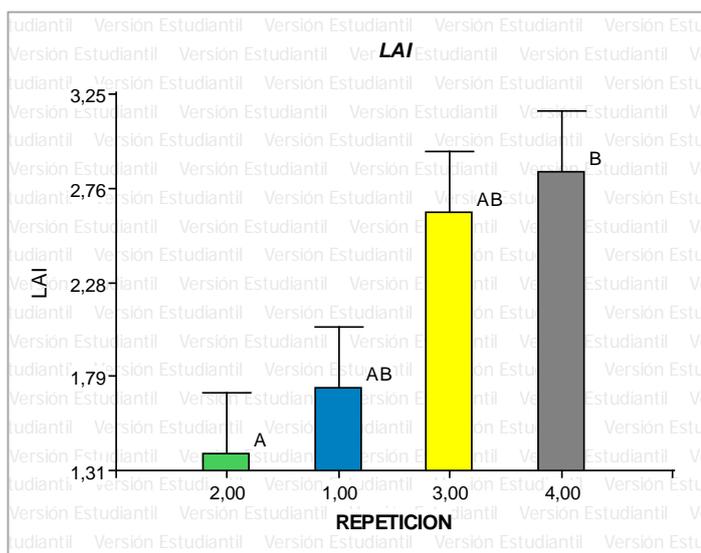


Figura 94: Resultados de la prueba de Tukey para LAI según repetición

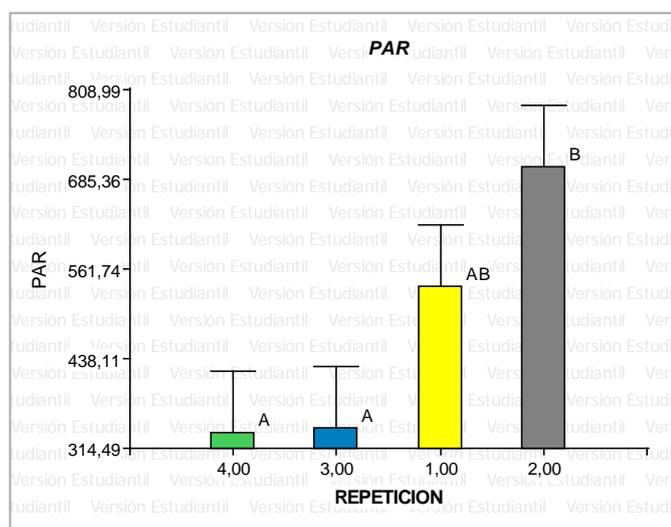


Figura 95: Resultados de la prueba de Tukey para PAR según repetición

4.1.6.3 Análisis de LAI y PAR según estados fenológicos

Tanto LAI como PAR para estados fenológicos no muestran significancia estadística, según lo apreciado en la Tabla 40 y en la Tabla 41 a través de la prueba de Tukey, pues ambos estados se encuentran en el mismo rango (A) para los dos índices.

Tabla 40.***Prueba de Tukey para LAI según estado fenológico***

ESTADO	Medias	n	E.E.
PANOJAMIENTO	1,97	12	0,22 A
RAMIFICACION	2,34	12	0,22 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 41.***Prueba de Tukey para PAR según estado fenológico***

ESTADO	Medias	n	E.E.
RAMIFICACION	475,42	12	59,04 A
PANOJAMIENTO	485,62	12	59,04 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.2 Resultados del Cultivo Comercial

En cuanto al cultivo comercial, se presentan a continuación los ortomosaicos resultantes, las tablas de datos y mapas NDVI, el análisis exploratorio de datos y el resultado de las correlaciones planteadas con su respectiva discusión.

4.2.1 Resultados de los ortomosaicos

En la Figura 96 y Figura 97, se presentan los ortomosaicos obtenidos: RGB, banda Red y banda NIR, respectivamente, los cuales se encuentran a mayor detalle en el Anexo 10. En cada uno de ellos se aplicó una máscara que permita extraer la zona en estudio.

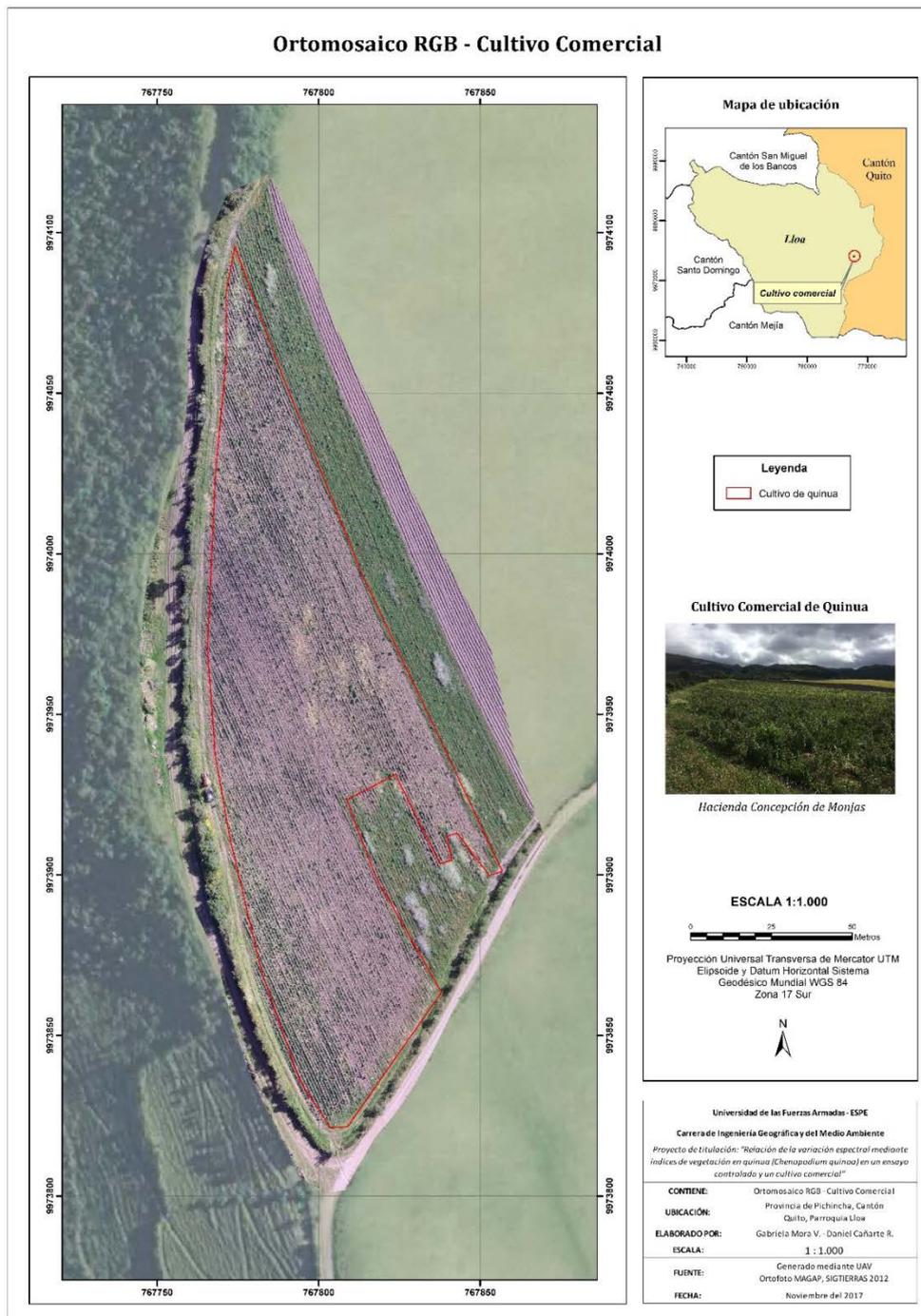
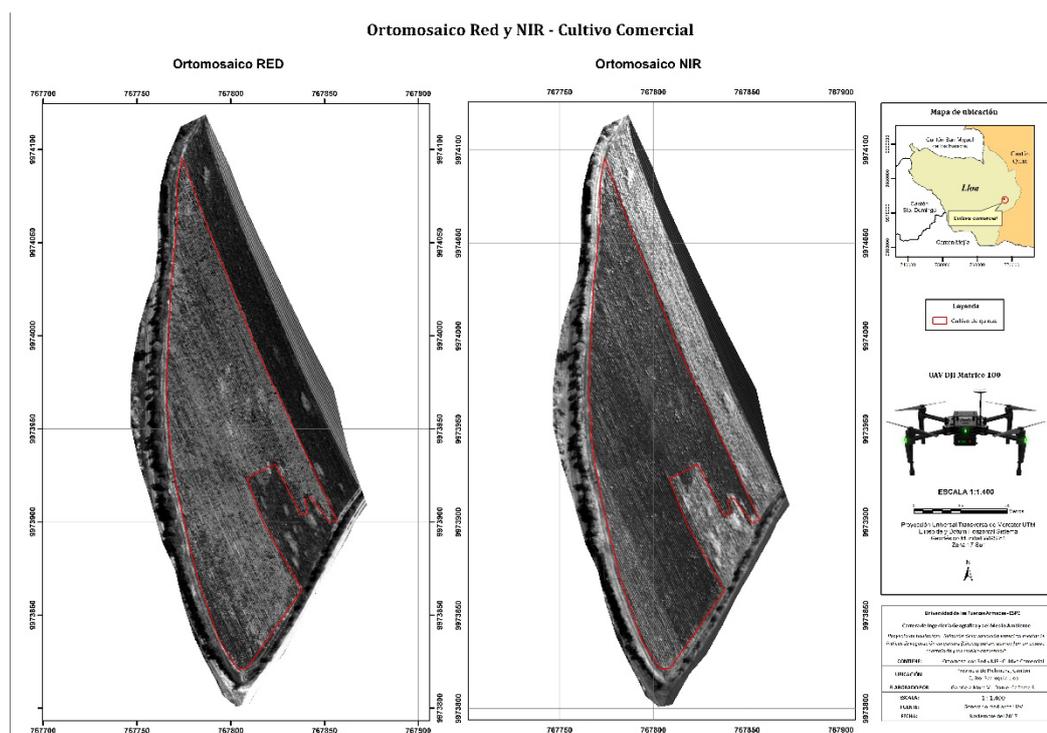
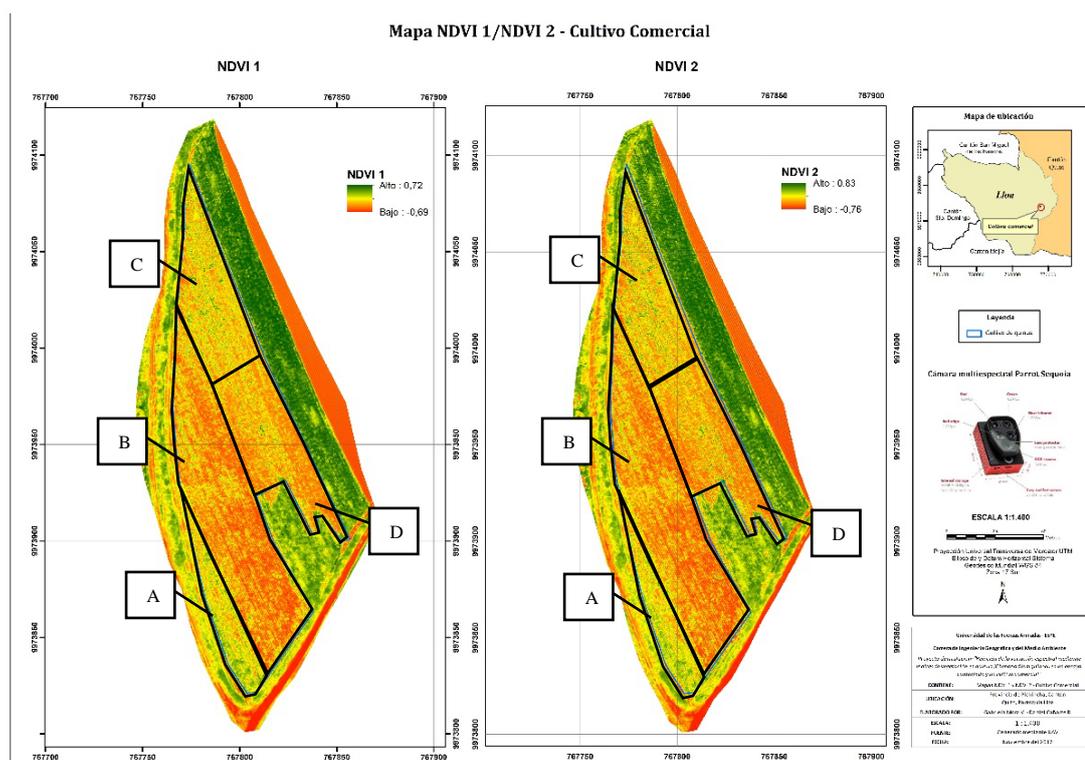


Figura 96: Ortomosaico RGB del cultivo comercial



4.2.2 Resultados de NDVI obtenido con UAV

De las imágenes tomadas con UAV, resultaron dos mapas NDVI, los que se muestran en la Figura 98, misma que se encuentra con mayor detalle en el Anexo 10; donde $NDVI_1$ es aquel obtenido automáticamente por el software, y $NDVI_2$ es el que se obtuvo a través de los ortomosaicos Red y NIR.



En la figura anterior, se han delimitado cuatro áreas de características similares sobre ambos mapas, con el fin de realizar comparaciones. En primer lugar, se observa que las escalas de valores NDVI son cercanas: NDVI₁ [-0,69;0,72] y NDVI₂ [-0,76;0,83]. El área A se caracteriza por tener tonalidades amarillas y verdes, lo que indica que la quinua tiene buena vigorosidad. El área B es la de mayor extensión y la que destaca de las demás por tener coloraciones rojas en su mayoría, ya que lo que predomina es suelo desnudo, antes que vegetación; por lo tanto, los valores del índice son bajos. La zona C muestra menos tonos rojizos y más tonos amarillentos y verdes, pues la vegetación en esta zona se encontró en mejor estado; comprobado al momento de realizar el muestreo en campo. Por último, el área D tiene más tonalidades rojas que C, pero menos que B, encontrándose en un intermedio de éstas.

4.2.3 Resultados de NDVI obtenido con espectroradiómetro

Se obtuvieron 71 puntos tomados con espectroradiómetro y georeferenciados mediante el método RTK de posicionamiento GPS, cuyas coordenadas se aprecian en la Figura 99.

ID	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	NDVI Espectroradiómetro
lloa2	767800,526	9973826,67	3145,041	0,783184
lloa3	767801,428	9973829,84	3145,165	0,494441
lloa4	767801,557	9973833,7	3145,545	0,346103
lloa5	767796,995	9973835,67	3145,899	0,456002
lloa6	767793,513	9973839,15	3146,293	0,237236
lloa7	767792,718	9973846,8	3146,977	0,195813
lloa8	767793,368	9973849,42	3147,272	0,277996
lloa9	767796,36	9973857,27	3147,733	0,50063
lloa10	767788,185	9973865,19	3148,661	0,545632
lloa11	767781,593	9973871,43	3149,259	0,243087
lloa12	767787,181	9973881,62	3149,488	0,644237
lloa13	767788,981	9973890,46	3149,83	0,528704
lloa14	767778,124	9973898,42	3150,648	0,251556
lloa15	767779,712	9973910,85	3151,372	0,562465
lloa16	767778,679	9973924,74	3152,474	0,708581
lloa17	767768,667	9973960,97	3156,493	0,358639
lloa18	767771,154	9973976,03	3158,61	0,324041
lloa19	767775,174	9973986,65	3160,312	0,675676
lloa20	767769,751	9974001,95	3162,843	0,577282
lloa21	767777,648	9974013,82	3164,801	0,522558
lloa22	767774,207	9974029,68	3167,175	0,429836
lloa23	767776,222	9974043,18	3169,405	0,467198
lloa24	767776,043	9974057	3171,718	0,557117
lloa25	767775,396	9974070,53	3173,995	0,397973
lloa26	767775,538	9974089,6	3177,097	0,499115
lloa27	767780,704	9974077,49	3175,262	0,462617
lloa28	767783,693	9974064,48	3173,148	0,513565
lloa29	767782,535	9974053,01	3171,161	0,484601
lloa30	767780,104	9974042,71	3169,385	0,647298
lloa31	767792,53	9974035,19	3168,457	0,465177
lloa32	767789,167	9974020,95	3166,372	0,46217
lloa33	767795,724	9974012,64	3165,04	0,341342
lloa34	767801,205	9973999,47	3162,559	0,385267
lloa35	767790,694	9974003,07	3163,297	0,544615
lloa36	767786,412	9973991,8	3161,188	0,567422
lloa37	767792,673	9973980,57	3159,345	0,632688
lloa38	767800,916	9973990,43	3160,89	0,568266
lloa39	767813,525	9973987,91	3160,271	0,489701
lloa40	767801,034	9973978,18	3159,008	0,338578
lloa41	767787,83	9973975,35	3158,502	0,655797
lloa42	767801,984	9973969,04	3157,471	0,344537
lloa43	767813,565	9973956,04	3155,61	0,49529
lloa44	767800,312	9973958,06	3156,082	0,499665
lloa45	767809,527	9973942,19	3154,105	0,505965
lloa46	767808,741	9973926,18	3152,176	0,709856
lloa47	767819,566	9973935,11	3152,845	0,557742
lloa48	767821,515	9973949,82	3154,566	0,198452
lloa49	767826,503	9973957,69	3155,141	0,640312
lloa50	767832,977	9973941,27	3152,747	0,449076
lloa51	767828,297	9973932,24	3152,146	0,419682
lloa52	767839,655	9973924,96	3150,193	0,454783
lloa53	767833,46	9973907,86	3149,259	0,55045
lloa54	767847,288	9973905,02	3147,532	0,481703
lloa55	767820,775	9973854,88	3146,144	0,589516
lloa56	767812,233	9973854,1	3146,525	0,527272
lloa57	767818,266	9973864,33	3146,797	0,501821
lloa58	767824,621	9973879,14	3147,393	0,249227

CONTINÚA



lloa59	767810,751	9973878,72	3147,86	0,59659
lloa60	767797,534	9973883,56	3148,992	0,624775
lloa61	767811,536	9973908,61	3150,282	0,591821
lloa62	767799,152	9973902,76	3150,097	0,425312
lloa63	767792,606	9973912,35	3151,027	0,333693
lloa64	767804,408	9973923,54	3151,922	0,460248
lloa65	767813,171	9973935,88	3153,088	0,45716
lloa66	767799,711	9973934,4	3153,17	0,663199
lloa67	767787,785	9973933,95	3153,182	0,301034
lloa68	767777,469	9974082,73	3176,081	0,580367
lloa69	767805,655	9974007,31	3164,052	0,542349
lloa70	767779,916	9973985,11	3160,02	0,456063
lloa71	767781,804	9973965,44	3156,992	0,318902
lloa72	767817,615	9973971,9	3157,483	0,629737

Figura 99: Coordenadas de los puntos de muestreo y valores NDVI

Espacialmente, estos puntos se visualizan en la Figura 99.

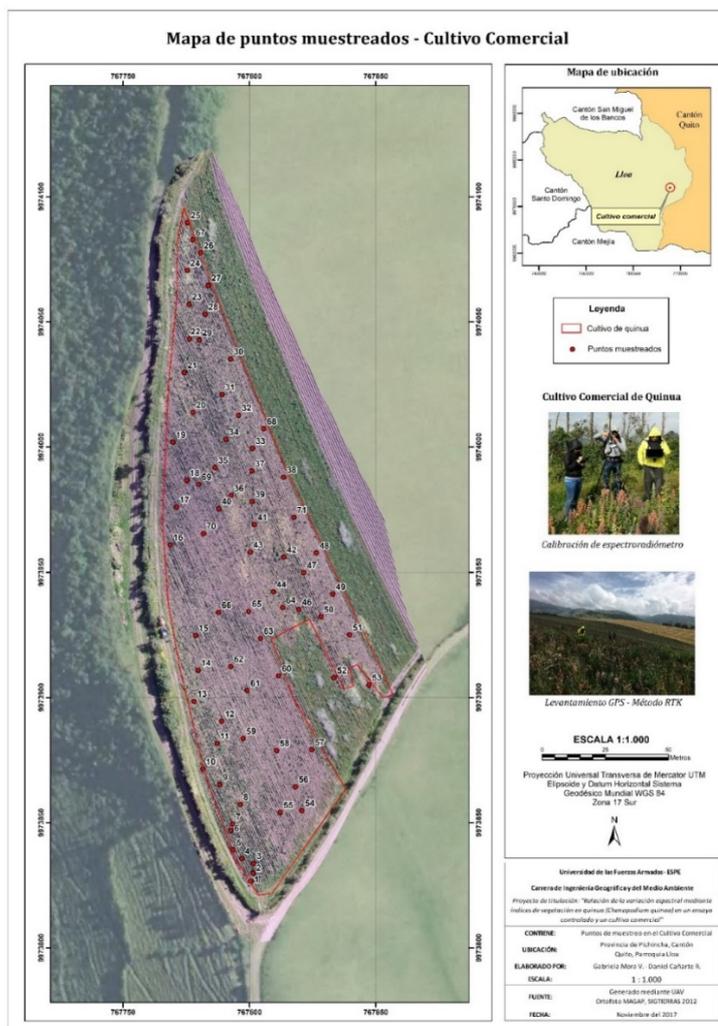


Figura 100: Distribución espacial de los puntos muestreados en el cultivo comercial

4.2.4 Resultados de los análisis exploratorios

A continuación, se presenta la tabla que contiene los tres conjuntos de datos obtenidos, a los que posteriormente se les realizó un análisis exploratorio (véase Figura 101).

Punto	NDVie	NDVI1	NDVI2
1	0.78318	0.21804	0.03757
2	0.49444	0.08183	0.26871
3	0.34610	0.11141	0.15329
4	0.45600	0.28216	0.08515
5	0.23724	0.04842	0.01066
6	0.19581	0.23864	0.23761
7	0.27800	-0.09101	0.18924
8	0.50063	-0.15086	0.21030
9	0.54563	0.10615	0.24132
10	0.24309	0.23129	0.02220
11	0.64424	0.21953	0.29871
12	0.52870	-0.12592	0.00888
13	0.25156	0.19544	0.21150
14	0.56247	-0.32096	0.17471
15	0.70858	-0.17919	0.17697
16	0.35864	0.10249	0.11416
17	0.32404	0.04211	0.16641
18	0.67568	-0.44516	0.15896
19	0.57728	-0.07218	0.16074
20	0.52256	-0.14261	0.23525
21	0.42984	-0.16577	0.23748
22	0.46720	-0.06545	0.44627
23	0.55712	0.10967	0.31725
24	0.39797	-0.08173	0.10609
25	0.49912	0.23726	0.36989
26	0.58037	-0.21214	0.19779
27	0.46262	0.42835	0.30119
28	0.51357	0.14957	0.49768
29	0.48460	-0.14001	0.34458
30	0.64730	-0.13387	0.28140
31	0.46518	0.06856	0.23998
32	0.46217	-0.02818	0.30824
33	0.34134	-0.12608	0.17250
34	0.54235	-0.21117	0.15437
35	0.38527	-0.07781	0.37630
36	0.54462	-0.01886	0.23376
37	0.56742	0.12078	0.31254
38	0.45606	-0.14311	0.01622
39	0.63269	-0.14893	0.11748
40	0.56827	-0.16913	0.00237
41	0.48970	-0.24790	0.26391
42	0.33858	-0.28851	0.21815
43	0.65580	-0.12863	0.08191
44	0.31890	-0.30571	0.04721
45	0.34454	-0.29159	0.21120
46	0.62974	-0.03397	0.25276
47	0.49529	-0.00612	0.47199
48	0.49967	-0.02886	0.23637
49	0.50597	-0.33875	0.07987
50	0.70986	-0.38413	0.14869
51	0.55774	-0.01150	0.02846
52	0.19845	0.22339	0.17317
53	0.64031	-0.37940	0.18598
54	0.44908	-0.11649	0.02466
55	0.41968	-0.38757	0.25412
56	0.45478	-0.28312	-0.03494
57	0.55045	-0.30884	0.27730
58	0.48170	-0.29805	0.31078

CONTINÚA



59	0.58952	-0.08572	0.15789
60	0.52727	-0.27551	0.01793
61	0.50182	-0.36923	0.15218
62	0.24923	-0.35588	-0.15563
63	0.59659	-0.32635	-0.09899
64	0.62478	-0.47793	0.21287
65	0.59182	-0.44527	-0.54774
66	0.42531	-0.27363	0.20758
67	0.33369	-0.53261	-0.04530
68	0.46025	-0.53710	-0.21758
69	0.45716	-0.32323	0.04459
70	0.66320	-0.47252	-0.05415
71	0.30103	-0.46122	-0.29806

Figura 101: Valores NDVI obtenidos del cultivo comercial

4.3.4.1 Análisis exploratorio de datos NDVI_E

En la Tabla 44 se aprecian los estadísticos resultantes de los valores NDVI obtenidos con espectroradiómetro (NDVI_E).

Tabla 42.

Resumen estadístico NDVI_E

<i>NDVI espectroradiómetro</i>	
Media	0.4831
Mediana	0.4953
Desviación estándar	0.1315
Varianza de la muestra	0.0173
Coefficiente de asimetría	-0.2767
Rango	0.5874
Mínimo	0.1958
Máximo	0.7832
Número de datos	71

Como se observa en la tabla anterior, el valor mínimo es 0.1958 y el máximo es 0.7832, con lo que se establece que la escala de NDVI con este equipo va aproximadamente entre 0 y 1; esto se debe a que el espectroradiómetro toma únicamente valores positivos de reflectancia. En cuanto a las medidas de tendencia central (media y mediana), toman valores cercanos, concluyendo así que los datos tienen una distribución normal.

En la Figura 100 se ilustra el histograma de frecuencias del conjunto de datos.

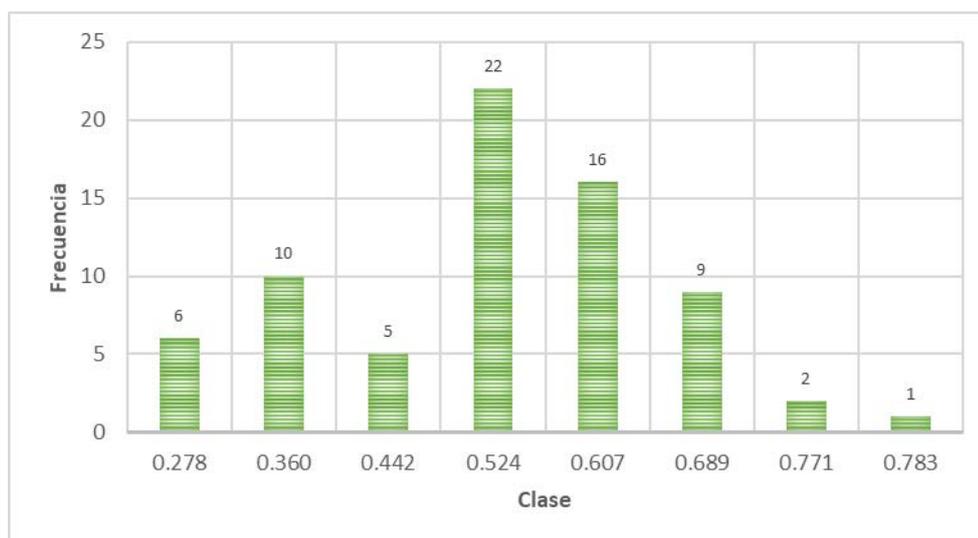


Figura 102: Histograma de datos NDVI_E

Con el histograma, se confirma la disposición de los datos, la cual corresponde a una distribución normal, en donde la mayoría de los valores se encuentran cercanos a la media. El coeficiente de asimetría mostrado en la Tabla 44 (-0.2767), al ser negativo, muestra que existe una menor cantidad de datos por debajo de la media, tal como se observa en la Figura 100.

Por otro lado, se generó un diagrama de caja, que se visualiza en la Figura 101.

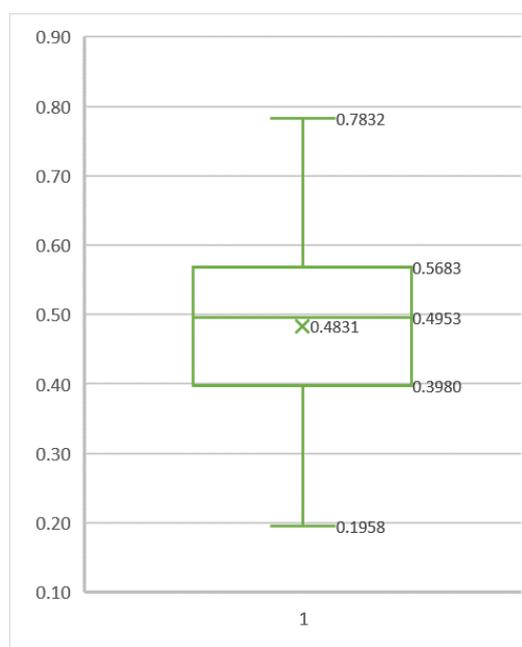


Figura 103: Diagrama de caja de datos NDVI_E

El diagrama de caja anterior expresa que todos los valores se encuentran dentro de los límites, establecidos como 1.5 veces el Rango Inter Cuartil ($RIC = Cuartil_3 - Cuartil_1$); por lo tanto, no existen valores atípicos en el conjunto de datos. Igualmente se confirma que la media (0.4831) y mediana (0.4953) son muy cercanas.

4.3.4.2 Análisis exploratorio de datos NDVI₁

Los estadísticos de los valores NDVI obtenidos automáticamente del programa Pix4D se presentan en la Tabla 45.

Tabla 43.

Resumen estadístico NDVI₁

<i>NDVI con Pix4D</i>	
Media	-0.1241
Mediana	-0.1339
Desviación estándar	0.2245
Varianza de la muestra	0.0504
Coefficiente de asimetría	0.2132
Rango	0.9654
Mínimo	-0.5371
Máximo	0.4283
Número de datos	71

La tabla anterior muestra que, al igual que el conjunto de datos anterior, la media y mediana se encuentran cercanas, determinando así que se distribuyen normalmente. De acuerdo a los valores máximos y mínimos, los valores NDVI obtenidos en el software se encuentran en una escala de -1 a 1.

El histograma de los valores NDVI₁ se encuentra en la Figura 102.

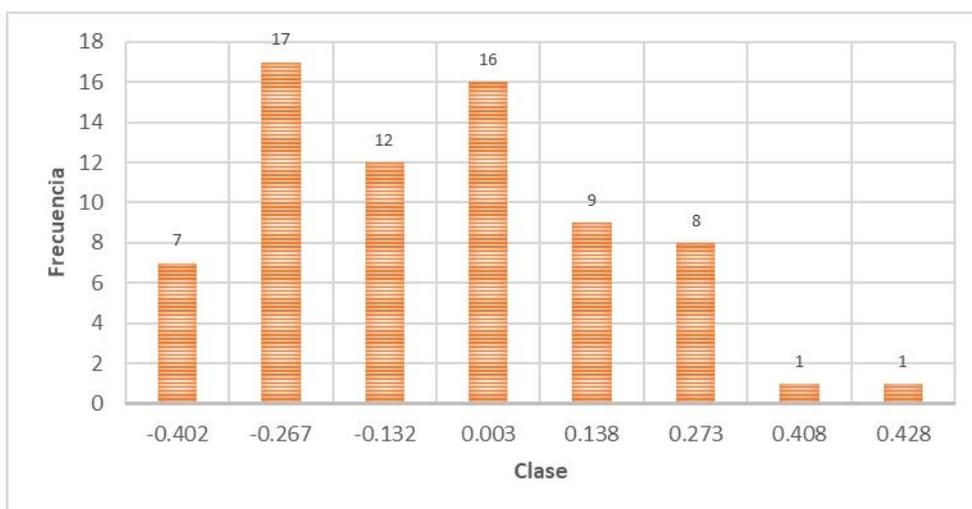


Figura 104: Histograma de datos NDVI₁

El coeficiente positivo de asimetría, expuesto en la Tabla 45, indica que la mayoría de los datos se encuentran acumulados ligeramente hacia la izquierda de la media, tal como se observa en la Figura 102; igualmente se confirma la distribución normal de los datos.

A continuación, se visualiza el diagrama de caja de los datos en la Figura 103.

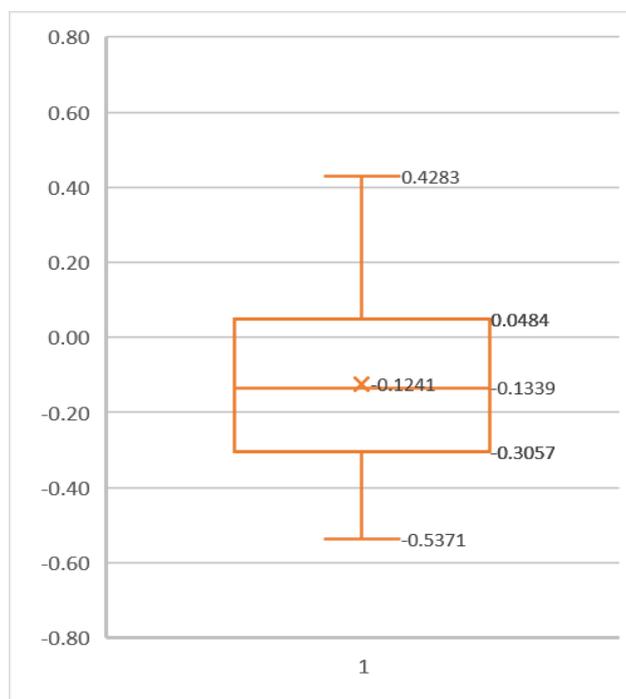


Figura 105: Diagrama de caja de datos NDVI₁

Al interpretar el diagrama de caja anterior, se observa que no existen valores anómalos y que todos se encuentran dentro de los límites establecidos.

4.3.4.3 Análisis exploratorio de datos NDVI₂

La Tabla 46 expone los estadísticos correspondientes a los valores NDVI obtenidos a partir de los ortomosaicos Red y NIR.

Tabla 44.

Resumen estadístico NDVI₂

<i>NDVI con ortomosaicos</i>	
Media	0.1522
Mediana	0.1747
Desviación estándar	0.1713
Varianza de la muestra	0.0293
Coefficiente de variación	0.1929
Coefficiente de asimetría	-1.2048
Rango	1.0454
Mínimo	-0.5477
Máximo	0.4977
Número de datos	71

De igual manera, se observa que la media y mediana tienen valores próximos, con lo que se considera que el grupo de datos se distribuye de forma normal; además, el mínimo y máximo valor (-0.5477 y 0.4977, respectivamente) indican que la escala de NDVI en este conjunto de datos va desde -1 a 1.

El histograma de frecuencias de los valores NDVI₂ se encuentran en la Figura 104.

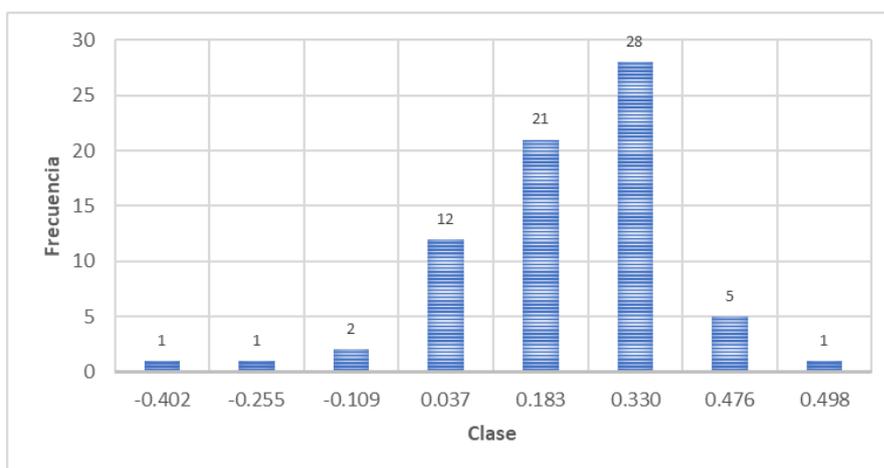


Figura 106: Histograma de datos NDVI₂

El histograma anterior, junto con el coeficiente de asimetría de la Tabla 46, indican que los datos están acumulados en su mayoría sobre el valor de la media; además se confirma gráficamente la distribución normal de datos.

En la Figura 105 se observa el diagrama de caja para estos datos.

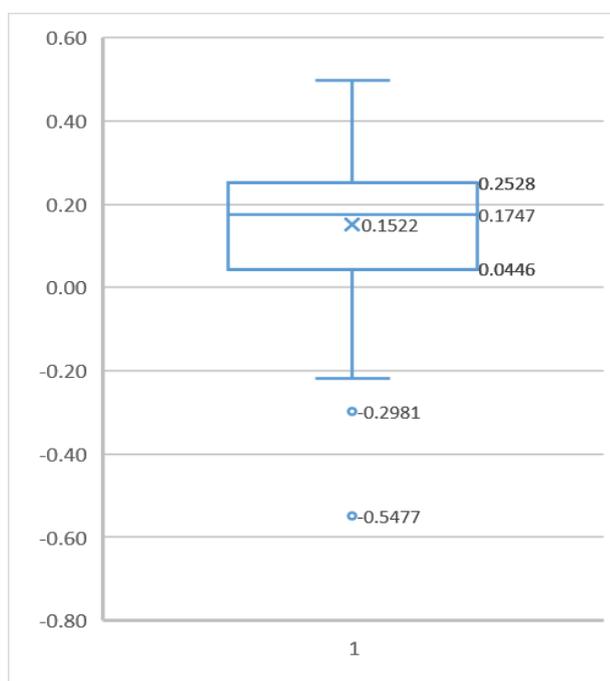


Figura 107: Diagrama de caja de datos NDVI₂

El diagrama de caja presentado, indica que existen dos puntos que, al parecer, corresponden a datos atípicos. Dado que no fue posible examinar las causas por las que estos valores están fuera de los límites establecidos, se decidió calcular la correlación con y sin estas anomalías; lo que dio como resultado una diferencia imperceptible en el valor de R^2 . En consecuencia, estos datos fueron conservados y se trabajó con los 71 puntos en total.

4.2.5 Resultados de las correlaciones

A través de la función Coeficiente de correlación del módulo de Análisis de datos de Microsoft Excel, se tuvo como resultados los valores expuestos en la Tabla 47.

Tabla 45.**Resultados de las correlaciones**

	NDVI _E	NDVI _I	NDVI ₂
NDVI _E	1		
NDVI _I	-0.1847	1	
NDVI ₂	0.0675	0.4452	1

En cuanto a la correlación A, en la que se compararon datos del NDVI obtenido del espectroradiómetro (NDVI_E) vs. NDVI obtenido del mapa generado automáticamente en Pix4D (NDVI_I), se obtuvo un valor de R^2 (coeficiente de correlación de Pearson) de -0.1847, la cual corresponde a una correlación negativa según Diaz (2015) (véase Tabla 13, cap. 2).

Mientras que la correlación B, en la que se compararon los datos del NDVI obtenido del espectroradiómetro (NDVI_E) vs. NDVI obtenido de los ortomosaicos Red y NIR (NDVI₂), el resultado fue un R^2 de 0.0675; por lo tanto, según Diaz (2015), se trata de una correlación débil, ya que se encuentra cercano a cero.

La quinua, al ser una planta herbácea, no posee una masa vegetal significativa, en comparación, por ejemplo, con la palma africana; lo cual se evidencia en la gran cantidad de suelo que se observa en los ortomosaicos obtenidos. Ésta es la razón principal por la que los valores de correlación de NDVI son bajos y negativos, para cada caso; ya que el índice se ve influenciado por la acción del suelo. Esto se corrobora con el estudio de Villaverde (2017), quien menciona que el uso del NDVI es más útil en zonas donde la vegetación tiene un mayor índice de superficie foliar, mismas que pueden ser las regiones de la costa y oriente del Ecuador. Andrade y Moncayo (2017) obtuvieron un valor de correlación más alto usando NDVI; pero al tratarse de un estudio sobre pastos, el suelo no influyó mayormente en sus resultados.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se han cumplido con los objetivos y metas planteadas para esta investigación, que incluyen la recolección de datos espectrales de quinua y de LAI y PAR en el ensayo controlado (IASA), mismos que dieron como resultados: una ecuación en base a reflectancias para el cálculo de SAVI, valores de índices NDVI, CCI y SAVI, firmas espectrales, curvas y gráficos comparativos con los que se establecieron relaciones entre los índices (véase apartados 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5 y 4.1.6 del cap. 4; Anexo 03), lo que permitió su posterior análisis estadístico e interpretación. En cuanto al cultivo comercial (parroquia de Lloa), se capturaron datos espectrales con espectralradiómetro (véase apartado 4.2.3 del cap. 4) e imágenes RGB y multiespectrales (Red, Green, RedEdge y NIR) a través de un UAV, con las que se obtuvo como resultado ortomosaicos y mapas NDVI (véase Anexo 10); además de valores numéricos de dicho índice, que permitieron realizar un análisis de correlación (véase numerales 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.4 del cap. 4).
- Comparando los valores obtenidos de NDVI en ambas zonas de estudio, se observa que son similares: en el ensayo controlado (IASA) se tiene una escala de 0,40 a 0,65; mientras que en el cultivo comercial (parroquia de Lloa), los valores mínimos y máximos son 0,20 y 0,78, respectivamente.
- Se obtuvieron 48 firmas espectrales del ensayo controlado, agrupadas considerando el número de muestreo, la dosis de fertilización y la repetición, tal como se amplía en el Anexo 03. Cabe aclarar que se realizaron 4 muestreos (preliminar, 1, 2 y 3), se evaluaron 3 tratamientos (Control, 100 y 200 Kg/Ha) y 4 repeticiones (I, II, III y IV). Para el muestreo preliminar, las firmas reflejan suelo desnudo, debido a que se tomaron datos antes de la siembra de la quinua. Para el muestreo #1, las firmas tienden a parecerse a la curva típica de vegetación, aunque no tan definidas debido al tamaño y estado fenológico en el que se encontraba la

planta (etapa fenológica: ciclo vegetativo, 30 cm de altura). En el muestreo #2, se observa que las firmas corresponden netamente a vegetación, pues su masa vegetal había aumentado con respecto a la fecha del anterior muestreo (etapa fenológica: ramificación), y que una de las diferencias notables entre ellas radica en la vigorosidad, relacionada directamente con la dosis de fertilización a la que fue sometida cada parcela. En el muestreo #3 (etapa fenológica: panojamiento), las firmas muestran incrementos en la pendiente de los 700 nm, lo que se interpreta como un aumento de vigorosidad; 0,9 en reflectancia es el valor en el que la quinua encuentra su pico máximo de crecimiento, ya que, a partir de este valor, la curva comienza a descender, pues a partir de esta etapa, la planta comienza su periodo de senescencia.

- La agricultura de precisión permitió analizar el comportamiento de la quinua en un ensayo controlado, expuesta a diferentes factores como: dosis de nitrógeno, estados fenológicos, repeticiones (véase apartados 4.1.2, 4.1.3 y 4.1.4 del cap. 4). Esta herramienta de gestión de parcelas trae beneficios desde el punto de vista agrícola, porque se pueden ajustar las prácticas de cultivo de acuerdo a las necesidades de la planta; medioambiental, pues se reduce el impacto relacionado con la actividad agrícola; y económico, pues aumenta la eficiencia de las prácticas; además de contribuir en la toma de decisiones y mejorar la calidad de los cultivos.
- Los índices NDVI, CCI y SAVI han hecho posible la diferenciación de quinua con y sin fertilizante mediante un análisis espectral; sin embargo, no es posible distinguir la cantidad de nitrógeno empleada por este método, como se observa en los apartados 4.1.2.1 y 4.1.3.1 del capítulo de Resultados. Además, fue factible diferenciar espectralmente la quinua en sus primeros estados fenológicos mediante estos índices (véase apartados 4.1.2.3, 4.1.3.3 y 4.1.4.3 del cap. 4). Todo esto se evidencia de manera gráfica a través de las firmas espectrales.
- Se ratifica lo encontrado en bibliografía (Basantes, 2015; Peralta, 2009; CARE, 2015) respecto a la dosis óptima de nitrógeno para quinua: entre 80 y 120 Kg/Ha, como lo indican los numerales 4.1.2.1 y 4.1.3.1 del capítulo de Resultados. Superar este intervalo no significa un aumento de rendimiento o vigorosidad, sino más bien supone una disminución en el rendimiento del grano, desperdicio de fertilizante y,

por ende, gastos monetarios innecesarios para los agricultores. Todo esto se evidencia de manera gráfica a través de las firmas espectrales.

- Los índices LAI y PAR tienen una relación inversamente proporcional entre ellos, como se demuestra en el apartado 4.1.6.1 del capítulo 4. Mientras LAI aumenta, PAR disminuye; lo que significa que: el aumento de masa vegetal provoca una disminución en el paso de luz solar hacia las partes más bajas de la planta y el suelo.
- En la etapa de panojamiento, la quinua tiene una mayor cantidad de hojas que en la etapa de ramificación, por lo tanto, se esperaría que los valores de LAI aumenten; sin embargo, disminuyeron, como se observa en el apartado 4.1.6.3 del capítulo de Resultados. Esto se debe a que los intervalos de muestreo fueron cortos y no permiten ver las diferencias reales en cuanto a las etapas de desarrollo de la planta.
- Las distorsiones que se observan en las firmas espectrales extraídas del ensayo controlado, en las regiones de 1400, 1900 y 2500 nm aproximadamente, se deben a que los sensores VNIR y SWIR2 del espectroradiómetro presentan variaciones ocasionadas por la diferencia de temperatura ambiental. Se observa que estas distorsiones son menores en el Muestreo #2, a pesar de que todos los muestreos se realizaron casi a la misma hora del día (véase Anexo 03).
- Se determinó que el manejo agronómico del ensayo controlado es heterogéneo, ya que se encontraron diferencias significativas para las repeticiones (bloques) en todos los índices calculados, como lo muestran los apartados 4.1.2.2, 4.1.3.2, 4.1.4.2 y 4.1.6.2 del capítulo 4, sin que esto signifique alteraciones en los datos.
- El valor de R^2 (coeficiente de correlación de Pearson) de $NDVI_E$ vs. $NDVI_1$ indica una correlación negativa en los datos. De forma preliminar, se concluye que esto se debe a que al mapa $NDVI_1$ obtenido directamente del software Pix4D no se le realizó una ortorectificación, debido a la dificultad en la identificación de puntos de control; por lo tanto, su ubicación no es precisa (véase apartado 3.3.3 del cap. 3 y apartado 4.2.5 del cap. 4).
- En el caso de la correlación de $NDVI_E$ vs. $NDVI_2$, el valor de R^2 fue muy bajo, significando una correlación débil. Preliminarmente, el uso de NDVI en plantas que no alcanzan una densidad vegetal alta no es factible, debido a la influencia del

suelo; lo que se ve reflejado en este valor (véase apartado 3.3.3 del cap. 3 y apartado 4.2.5 del cap. 4).

5.2 Recomendaciones

- Para estudios de agricultura de precisión, se recomienda utilizar además otros índices de vegetación que complementen la investigación, como: TSAVI, NSII, RVI, TVI, entre otros.
- Dados los resultados encontrados mediante métodos espectrales, es recomendable continuarlos y extenderlos hacia otros cultivos de interés nacional.
- Este tipo de estudios deben realizarse sobre ensayos controlados; es decir, donde el investigador controle los factores que influyen sobre el cultivo, con el fin de tener una interpretación de los resultados más cercana a la realidad.
- Es posible utilizar los índices LAI y PAR como apoyo en el cálculo de biomasa o análisis de vigorosidad de vegetación, ya que están relacionados con la densidad vegetal.
- Se recomienda realizar un estudio para el establecimiento de una metodología de toma de datos en campo de LAI y PAR mediante el ceptómetro. Esta investigación debería hacerse primeramente en laboratorio, en donde es posible controlar el experimento y, posteriormente, pasarlo a campo y analizar todos los factores que influyen.
- Para estudios de LAI y PAR en campo, es necesario una evaluación constante y a largo plazo en cuanto a estos índices; un ejemplo es lo realizado por Righini & Grossi (2005), cuyo periodo de estudio comprendió 11 meses con 280 días de registro de datos.
- Para una mejor interpretación de las distorsiones observadas en las firmas espectrales obtenidas con espectroradiómetro, es importante obtener datos climáticos como humedad o precipitación.
- En lugar de NDVI, se podría usar SAVI para realizar estudios de correlación en herbáceas. NDVI debería ser usado para arbóreas, debido al área mínima de suelo que se observa desde arriba.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, C., Cabrera, S., Fernández, G., & Icasuriaga, M. (2017). *Firmas espectrales y características de coberturas fundamentales*. Recuperado el 6 de Noviembre de 2017, de https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi569PYo6nXAhUF7SYKHe_nCyAQFggwMAI&url=https%3A%2F%2Feva.fing.edu.uy%2Fpluginfile.php%2F159173%2Fmod_folder%2Fcontent%2F0%2FGrupo%252005%2520-%2520Firmas%2520espec
- Abril, N., Bárcena, A., Fernández, E., Galván, A., Jorrín, J., Peinado, J., . . . Túnez, I. (2009). *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. Universidad de Córdoba, Departamento de Bioquímica y Biología Molecular. Recuperado el 24 de Abril de 2017, de https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETR%C3%8DA.pdf
- ACG Drone. (2016). *Sequoia: Cámara con sensor multibanda para agricultura*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2017, de <http://www.acgdrone.com/parrot-sequoia-la-camara-con-sensor-multibanda-disenada-para-agricultura/>
- Agua Andes. (2015). *Espectrorradiometría, Recolección de muestras y Capacitación en Ayacucho por parte del Equipo PEER y la UNSCH*. Recuperado el 06 de Octubre de 2017, de <http://www.agua-andes.com/articulos/espectrorradiometria-recoleccion-muestras-y-capacitacion-ayacucho-parte-del-equipo-peer-y>
- Airbus Defence and Space. (2017a). *SPOT 6/7*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2017, de <http://www.intelligence-airbusds.com/es/5631-spot-67-descubra-la-diferencia>
- Airbus Defence and Space. (2017b). *Pléiades Products*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2017, de <http://www.intelligence-airbusds.com/en/3027-pleiades-50-cm-resolution-products>
- Allinger, N., Cava, M., De Jongh, D., Johnson, C., Lebel, N., & Stevens, C. (1971). *Química Orgánica* (Segunda ed.). España: Reverté. Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de https://books.google.com.ec/books?id=0hLx1I8UQ5sC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Andrade, B., & Moncayo, L. (2017). *Análisis de NDVI contrastando diferentes metodologías de toma de datos espectrales, en cultivos de pastos en etapa*

- previa al pastoreo*. Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Angulo, L. (2014). *Generación de cartografía básica a detalle mediante una metodología de toma con Aviones no Tripulados (UAV's)*. Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Recuperado el 18 de Septiembre de 2017, de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9434/1/T-ESPE-048572.pdf>
- Apogee Instruments. (2016). *Chlorophyll Content Meter CCM-200 Plus Manual*. Recuperado el 16 de Marzo de 2017, de <http://www.apogeeinstruments.com/content/CCM-200manual.pdf>
- Arbelo, M. (2015). *Tutorial de Teledetección: fundamentos físicos*. Recuperado el 4 de Mayo de 2017, de <https://marbelo.webs.ull.es/rs2.pdf>
- Argenta, G., Ferreira, P., Bortolini, C., Forsthofer, E., & Luiz, M. (2001). Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*. Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/26363301_Relacao_da_leitura_do_clorofilometro_com_os_teores_de_clorofila_extraivel_e_de_nitrogenio_na_folha_de_milho?enrichId=rgreq-ec0ae062235e81617cfe7736f240b27d-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2MzYzMzAxO0FTOjk5
- Argüelles, J., & Carvajal, G. (2013). *Estadística y Diseño de Experimentos: Aplicaciones prácticas para diseño de experimentos en sistemas agropecuarios tropicales*. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de http://digitool.gsl.com.mx:1801/webclient/StreamGate?folder_id=0&dvs=1504241253230~872
- ASD Inc. (2017). *FieldSpec 4 Hi-Res: High Resolution Spectroradiometer*. Recuperado el 23 de Agosto de 2017, de <https://www.asdi.com/products-and-services/fieldspec-spectroradiometers/fieldspec-4-hi-res>
- Badii, M., Castillo, J., Rodríguez, M., Wong, A., & Villalpando, P. (2007). Diseños experimentales e investigación científica. *Innovaciones de Negocios*, 4(2), 283-330. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de http://www.web.facpya.uanl.mx/rev_in/Revistas/4.2/A5.pdf
- Barrientos, A., Del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., & Rossi, C. (2007). *Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones*. Universidad Politécnica de Madrid, España. Recuperado el 17 de Septiembre de 2017, de <http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf>
- Basantes, E. (2015). Manejo de cultivos andinos del Ecuador. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Recuperado el 3 de Diciembre de 2016, de

<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10163/4/Manejo%20Cultivos%20Ecuador.pdf>

- Basra, S., Iqbal, S., & Afzal, I. (2014). Evaluating the Response of Nitrogen Application on Growth, Development and Yield of Quinoa Genotypes. *International Journal of Agriculture & Biology*, 16(5), 886-892. Recuperado el 13 de diciembre de 2016, de https://www.fspublishers.org/published_papers/60039_.pdf
- Bazile, D., Bertero, D., & Nieto, C. (2014). *Estado del arte de la quinua en el mundo en 2013*. Montpellier, Francia: FAO (Santiago de Chile) y CIRAD. Recuperado el 19 de diciembre de 2016, de <http://www.fao.org/3/a-i4042s.pdf>
- Becerra, R. (2011). *Imágenes satelitales*. Recuperado el 31 de Julio de 2017, de <https://es.slideshare.net/rodbece/modulo1-b-imagenessatelitales>
- Berti, M., Wilckens, R., Hevia, F., Serri, H., Vidal, I., & Mendez, C. (2000). Fertilización Nitrogenada en Quinoa (*Chenopodium Quinoa* WILLD). *Ciencia e Investigación Agraria*, 27(2), 81-90. Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de <http://rcia.uc.cl/index.php/rcia/article/view/999>
- Bojanic, A. (2011). *La quinua: cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial*. Informe Técnico, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. Recuperado el 20 de diciembre de 2016, de <https://goo.gl/0F7EB5>
- Bojanic, A. (2011). *La quinua: cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial*. Informe Técnico, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. Recuperado el 20 de diciembre de 2016, de <https://goo.gl/0F7EB5>
- Buill, F., Núñez, M., & Rodríguez, J. (2003). *Fotogrametría analítica*. Universitat Politècnica de Catalunya, SL.
- Calvache, M. (2015). *Suelos del Ecuador*. Artículo de Conferencia: VII Congreso Sudamericano de Agronomía. Recuperado el 08 de Septiembre de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/301701400_los_suelos_del_ecuador
- CARE Perú. (2015). *Manual de nutrición y fertilización de la quinua*. Lima, Perú. Recuperado el 23 de Agosto de 2017, de <http://www.care.org.pe/wp-content/uploads/2015/06/Manual-de-Fertilizacion-de-La-Quinua.pdf>
- Casanova, V. (2013). *Ondas Gravitatorias*. Recuperado el 26 de Febrero de 2017, de <http://vega00.com/2011/02/articulo-de-veronica-casanova-ondas.html/>
- Cenicaña. (2015). *Agricultura de precisión (AP)*. Recuperado el 14 de Junio de 2017, de <http://www.cenicana.org/web/programas-de-investigacion/agronomia/geomatica/agricultura-de-precision>

- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental, la observación de la Tierra desde el Espacio* (Tercera ed.). Barcelona, España: Editorial Ariel Ciencias.
- Coelho, L., & Nunes, J. (2007). *Fotogrametría digital*. Recuperado el 17 de Octubre de 2017, de <http://aqui.itaqui.unipampa.edu.br/materialaula/public/arquivos/20170804101847-1.pdf>
- Corrigan, F. (2017). *DroneZon*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2017, de <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/multispectral-sensor-drones-in-farming-yield-big-benefits/>
- Cuadrado, S. (2012). *"La quinua en el Ecuador situación actual y su industrialización"*. Tesis de posgrado. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5221/1/UPS-QT03869.pdf>
- Cúnsulo, M., Kurbán, A., & Papparelli, A. (2012). Inferencia de la temperatura del aire urbano a partir del NDVI utilizando imágenes satelitales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 11.01-11.07. Recuperado el 28 de Noviembre de 2016, de <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2012/2012-t011-a021.pdf>
- de Cara, J. (2006). *La observación fenológica en agrometeorología*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2016, de http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_AM/AM_2006_53_64_70.pdf
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Rodríguez, Á., & Martínez, J. (2007). Uso del Índice de Área Foliar y del Porcentaje de Cobertura del Suelo Para Estimar la Radiación Interceptada en Papa. *Agricultura Técnicina*, 67(1), 78-85. Recuperado el 28 de Diciembre de 2016, de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0365-28072007000100010&script=sci_arttext
- Debata, A., & Murty, K. (1983). Effect of foliar application of nitrogen, phosphorus and potassium salts on flag leaf senescence in rice. *Agricultural Science Digest*, 1, 23-26. Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=IN19840080257>
- Decagon Devices Inc. (2015). *Decagon Devices*. Recuperado el 11 de Septiembre de 2017, de <http://www.decagon.com/en/canopy/canopy-measurements/accupar-lp-80/>
- Decagon Devices Inc. (2017). *AccuPAR PAR/LAI Ceptometer Model PL-80*. Manual de operación. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de http://manuals.decagon.com/Manuals/10242_Accupar%20LP80_Web.pdf

- Díaz, J. J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Tesis de posgrado. Recuperado el Septiembre de 24 de 2017, de http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Dicovski, L. (2010). *Introducción al Diseño Experimental*. Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de <https://luisdi.files.wordpress.com/2008/08/unidad-3.pdf>
- DJI. (2017a). *Matrice 100*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2017, de <http://www.dji.com/es/matrice100/info>
- DJI. (2017b). *DJI Store*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2017, de http://store.dji.com/es/product/matrice-100?from=menu_products
- DJI. (2017c). *Zenmuse X3*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2017, de <http://www.dji.com/es/zenmuse-x3/info>
- Drones Made Easy. (2017). *Map Pilot for DJI*. Recuperado el 28 de Septiembre de 2017, de <https://www.dronesmadeeasy.com/Articles.asp?ID=254>
- Egas, L., Vilacrés, E., Salazar, D., Peralta, E., & Ruilova, M. (2010). Elaboración de un cereal para desayuno con base a quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) Expandida. *Revista Tecnológica ESPOL*, 23(2), 9-15. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/download/50/21>
- Erley, G., Kaul, H., Kruse, M., & Aufhammer, W. (2005). Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat under differing nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy*, 22, 95-100. Recuperado el 23 de Agosto de 2017, de https://www.researchgate.net/profile/Gunda_Schulte_Aufm_Erley/publication/223165628_Yield_and_nitrogen_utilization_efficiency_of_the_pseudocereals_amaranth_quinoa_and_buckwheat_under_differing_nitrogen_fertilization/links/55c1a9e908ae092e96685574/Yield-an
- ESA/AOES Medialab. (2012). *The Electromagnetic Spectrum*. Recuperado el 26 de Abril de 2017, de <http://sci.esa.int/education/50368-the-electromagnetic-spectrum/>
- Escalante, J. (1999). Área Foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra*, 17(2). Recuperado el 28 de Agosto de 2017, de <http://www.redalyc.org/html/573/57317208/>
- Etchevers, J., & Ávila, P. (1981). Efecto de la fecha de siembra, distancia entre surcos y ecotipos sobre el rendimiento y comportamiento de la quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild) en Chillán. *Revista Ciencia e Investigación Agraria*, 8(1), 19-26. Recuperado el 13 de diciembre de 2016, de <http://rcia.uc.cl/index.php/rcia/article/view/930>

- European Space Agency [ESA]. (2014). *Firmas espectrales*. Recuperado el 31 de Julio de 2017, de http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM6DYD3GXF_0.html
- Fundación Helvetas Honduras. (2014). *Módulo Establecimiento y Manejo de Cultivos I*. Manual. Recuperado el 05 de Septiembre de 2017, de https://assets.helvetas.ch/downloads/manual_establecimiento__y_manejo_de_cultivos_i.pdf
- Gallardo, B. (2007). *Estudio de viabilidad de aplicaciones de observación aérea con UAVs y elaboración de un plan de empresa*. Tesis de Pregrado. Recuperado el 17 de Septiembre de 2017, de <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3604/55726-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García, S. (2010). *Instrumentos de observación*. Universidad de Murcia. Recuperado el 6 de Marzo de 2017, de <http://webs.um.es/gregomc/IntroduccionAstronomia/Temas/04%20INSTRUMENTOS%20DE%20OBSERVACION.pdf>
- Geotronics. (2012). *Trimble R8 GNSS*. Recuperado el 6 de Julio de 2017, de <http://geotronics.es/productos/gnss/r8-gnss>
- Gholizadeh, A., Amin, M., Anuar, A., & Aimrun, W. (2009). Evaluation of Leaf Total Nitrogen Content for Nitrogen Management in a Malaysian Paddy Field by Using Soil Plant Analysis Development Chlorophyll Meter. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 4(4), 278-282. Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de <http://thescipub.com/PDF/ajabssp.2009.278.282.pdf>
- Gómez, L., & Aguilar, E. (2016). *Guía del cultivo de quinua*. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://www.fao.org/3/a-i5374s.pdf>
- Gómez, M. (2004). *Índice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales*. Tesis de grado, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Recuperado el 6 de Abril de 2017, de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1182/ING_422.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gonzaga, C. (2014). *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de la Plata, La Plata. Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/34487/Documento_completo.pdf?sequence=1
- GRAFCAN. (2015). *Ortofotos*. Recuperado el 20 de Octubre de 2017, de <https://www.grafcan.es/ortofotos>

- Greenwood, F. (2016). Drones en el horizonte: la nueva frontera de la innovación agrícola. *ICT Update*, 82, 2-4. Recuperado el 6 de Noviembre de 2017, de <http://ictupdate.cta.int/wp-content/uploads/sites/5/2017/02/ICT-82-SPA-LR-4.pdf>
- Grossi, H. (2004). Distribución espacial de la Radiación Fotosintéticamente Activa en Argentina. *Meteorológica*, 29(1-2), 27-36. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de <http://www.scielo.org.ar/pdf/meteoro/v29n1-2/v29n1-2a03.pdf>
- Hernández, J., & Montaner, D. (2009). *Patrones de respuesta espectral*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Recuperado el 31 de Julio de 2017, de <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Hern%C3%A1ndez%20&%20Montaner%202009%20SAF.pdf>
- Hidalgo, N., Pérez, A., & Longares, L. (2016). *Aplicación de la teledetección a la fenología de comunidades vegetales de tipo matorral de sierra bermeja*. España. Recuperado el 23 de Agosto de 2017, de https://www.researchgate.net/profile/Andres_V_Latorre/publication/304176747_Aplicacion_de_la_teledeteccion_a_la_fenologia_de_comunidades_vegetales_de_tipo_matorral_de_sierra_bermeja/links/5769125608ae3bf53d32f221.pdf
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309. Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/220040775_Huete_A_R_A_soil-adjusted_vegetation_index_SAVI_Remote_Sensing_of_Environment
- Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura [INTAGRI]. (2010). *El Índice de Área Foliar (IAF) y su Relación con el Rendimiento del Cultivo de Maíz*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2016, de <https://www.intagri.com/articulos/cereales/el-indice-de-area-foliar-iaf>
- Jauregui, L. (2010). *Introducción a la fotogrametría*. Recuperado el 11 de Octubre de 2017, de <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/>
- John Deere. (2017). *Rastra MX225*. Recuperado el 06 de Septiembre de 2017, de https://www.deere.com/es_LA/products/equipment/tillage/harrows/harrows_mx_225/harrows_mx_225.page
- Karszenbaum, H., & Barraza, V. (2000). *Introducción a la Teledetección cualitativa*. Recuperado el 2017 de Agosto de 2017, de <http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000032-25950268dd/5.-Firmas%20espectrales.pdf>
- Khanacademy. (2017). *Luz y pigmentos fotosintéticos*. Recuperado el 19 de Septiembre de 2017, de <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the->

light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-and-photosynthetic-pigments

- Lerma, J. (2002). *Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital*. España: Universitat Politècnica de València.
- Luque, J. (2017). *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*. Recuperado el 18 de abril de 2017, de https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- Luzón, S. (2016). *Respuesta de la quinua variedad Tunkahuan a la fertilización nitrogenada, en las condiciones edafoclimáticas de la Argelia*. Tesis de Pregrado. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/10110/1/TESIS%20STALIN%20LUZ%C3%93N%20ZUMBA.pdf>
- Macagnone, M. (2015). *Jackson Memorial High School*. Recuperado el 19 de Octubre de 2017, de <https://www.jacksonsd.org/Domain/756>
- Mazón, N., Peralta, E., & Rivera, M. (2003). *Producción de semilla de la variedad INIAP - Tunkahuan en Ecuador*. Quito, Ecuador: Editorial PREDUZA. Recuperado el 30 de diciembre de 2016, de <https://goo.gl/I2ft9E>
- Mendoza, C., Carlos, R., Waldo, O., Jorge, F., Héctor, F., & Ernesto, S. (2014). *Comparación de dos métodos para medir el Índice de Área Foliar de Chile Poblano en invernadero*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2016, de https://www.researchgate.net/publication/267926789_COMPARACION_DE_DOS_METODOS_PARA_MEDIR_EL_INDICE_DE_AREA_FOLIAR_DE_CHILE_POBLANO_EN_INVERNADERO
- Meneses, C. (2012). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylya: Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales*(238), 39-46. Recuperado el 28 de Noviembre de 2016, de <http://www.fao.org/docrep/015/i2560s/i2560s07.pdf>
- Mimbela, N. (2010). *Monitoreo de los ecosistemas agrícolas y naturales en la región Piura desde las tecnologías: Teledetección y Sistemas de Información Geográfica*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Recuperado el 30 de diciembre de 2016, de <https://goo.gl/U36WEn>
- Mina, D. (2014). *Evaluación agronómica de líneas F5 de quinua (Chenopodium quinoa Willd.), en dos localidades de la Serranía, Ecuador*. Tesis de Pregrado. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/2560/1/T-UCE-0004-78.pdf>
- Ministerio para la Economía Popular [MINEP]. (2005). *Manejo Agronómico de los Cultivos*. Módulo de aprendizaje. Recuperado el 06 de Septiembre de 2017, de http://www.inces.gob.ve/wrappers/AutoServicios/Aplicaciones_Intranet/Mate

rial_Formacion/pdf/ALIMENTACION/PRODUCTOR%20AGRICOLA%20VEGETAL%201412238/CUADERNOS/MANEJO%20AGRONÓMICO%20DE%20LOS%20CULTIVOS.pdf

- Montoya, L., Martínez, L., & Peralta, J. (2005). Analisis de variables estratégicas para la conformación de una cadena productiva de quinua en Colombia. *INNOVAR. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 15(25), 103-119. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://www.redalyc.org/pdf/818/81802508.pdf>
- Mujica, A., & Jacobsen, S. (2006). La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y sus parientes silvestres. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 449-457. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://quinua.pe/wp-content/uploads/2013/03/La-quinua-y-sus-parientes.pdf>
- Mullo, A. (2011). *"Respuesta del cultivo de quinua (Chenopodium quinoa Willd) a tres tipos de abonos orgánicos, con tres niveles de aplicación, bajo el sistema de labranza mínima, en la comunidad, Chacabamba Quishuar, Provincia de Chimborazo"*. Tesis de Pregrado. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/792/1/13T0714%20.pdf>
- Ordiales, R. (2007). Prontuario de la Radiación Electromagnética. *El Escéptico*(24), 40-51. Recuperado el 14 de Mayo de 2017, de http://www.eeza.csic.es/Documentos/Publicaciones/RadiacionElectromagnetica_Escéptico24.pdf
- Organización de Estados Americanos [OEA]. (1978). *Clasificación taxonómica de los suelos identificados*. Recuperado el 08 de Septiembre de 2017, de Proyecto de Desarrollo Integrado de la Región Oriental de Panamá - Darién: <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea30s/ch026.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2003). *Capítulo 1: Cosecha*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2017, de <http://www.fao.org/docrep/006/Y4893S/y4893s04.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2013). *¿Qué es la quinua?* Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://www.fao.org/quinoa-2013/what-is-quinoa/planta/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2017a). *¿Qué es el Suelo?* Recuperado el 08 de Septiembre de 2017, de <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2017b). *Quinua*. Recuperado el 16 de Febrero de 2017, de <http://www.fao.org/quinoa/es/>
- Otero, I., Ezquerro, A., Rodríguez, R., Martín, L., & Bachiller, I. (2010). *Fotogrametría*. Recuperado el 17 de Octubre de 2017, de

http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGAMETRIA_Y_TELEDETECCION/Fotogrametria/fotogrametria_cap_libro.pdf

- Parrot. (2017). *Parrot Sequoia*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2017, de <https://www.parrot.com/es/profesional/parrot-sequoia#parrot-sequoia>
- Peralta, E. (2009). *La quinua en el Ecuador, "Estado del Arte"*. Recuperado el 19 de diciembre de 2016, de <https://goo.gl/rWfZC>
- Peralta, E. (2010a). Producción y distribución de semilla de buena calidad con pequeños agricultores de granos andinos: Chocho, Quinua, Amaranto. Programa Nacional de Leguminosas y Granos Andinos. *Revista del Programa Nacional de Leguminosas y Granos Andinos*(169), 1-68. Recuperado el 19 de diciembre de 2016, de <https://goo.gl/eWwaaC>
- Peralta, E. (2010b). *Iniap Tunkahuan: variedad mejorada de quinua de bajo contenido de saponina*. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de [http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/QUINUA%20INIAP%20UNKAHUAN%202010%20\(1\).pdf](http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/QUINUA%20INIAP%20UNKAHUAN%202010%20(1).pdf)
- Peralta, E., Mazón, N., Murillo, Á., Rivera, M., Rodríguez, D., Lomas, L., & Monar, C. (2012). *Manual agrícola de granos andinos: Chocho, Quinua, Amaranto y Ataco. Cultivos, variedades y costos de producción*. Manual. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/MANUAL%20AGRICOLA%20GRANOS%20ANDINOS%202012.pdf>
- Quishpe, J. (2015). *Informe del Índice de Vegetación NDVI - Bellavista*. Recuperado el 28 de diciembre de 2016, de <https://goo.gl/leIpNy>
- Reghini, R., & Grossi, H. (2005). Análisis de la correlación entre la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar global en San Miguel, Provincia de Buenos Aires. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de https://www.researchgate.net/profile/Hugo_Grossi_Gallegos/publication/237205736_ANALISIS_DE_LA_CORRELACION_ENTRE_LA_RADIACION_FOTOSINTETICAMENTE_ACTIVAY_LA_RADIACION_SOLAR_GLOBAL_EN_SAN_MIGUEL_PROVINCIA_DE_BUENOS_AIRES/links/5576288908ae75363751a801/ANAL
- Riofrío, V. (2013). *¿Qué es la radiación?* Recuperado el 19 de Septiembre de 2017, de <http://blog.espol.edu.ec/vicenteriofrío/files/2013/08/RADIACION-para-CRIEEL-agosto-2013.pdf>
- 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(4), 611-623.

- Recuperado el 28 de Noviembre de 2016, de
<http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v4n4/v4n4a10.pdf>
- Rueda, J. (2017). *Principios del Diseño Experimental*. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de <http://www.unalmed.edu.co/~jarueda/PDE.pdf>
- Sánchez Otero, J. (2006). *Introducción al Diseño Experimental*. Quito: Quality Print.
- Sánchez, E., Torres, M., Palacios, A., Aguilar, M., Pino, I., & Granado, L. (2000). Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como Indicadores para la Asignación de Modelos de Combustible para la Estimación del Riesgo de Incendios en Andalucía. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible*, 164-174. Recuperado el 15 de Agosto de 2017, de http://www.age-geografia.es/tig/docs/IX_2/Sanchez_Esperanza.PDF
- Sánchez, J. (2006). *Introducción a la fotogrametría*. Recuperado el 17 de Octubre de 2017, de ftp://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Fotogrametria/Unidad6/Introduccion_a_la_Fotogrametria.pdf
- Sarría, F., & Palazón, J. (2008). *Fundamentos físicos de la teledetección*. Universidad de Murcia. Recuperado el 29 de Marzo de 2017, de <http://ocw.um.es/ciencias/herramientas-de-teledeteccion-aplicadas-a-la-material-de-clase-1/tema-1-fundamentos-fisicos-de-la-teledeteccion.pdf>
- Satellite Imaging Corporation. (2017). *RapidEye Satellite Sensor (5m)*. Recuperado el 30 de Septiembre de 2017, de <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/rapideye/>
- Schröder Group. (2017). *Luz visible*. Recuperado el 19 de Septiembre de 2017, de <http://www.schreder.com/es-uy/centro-formacion/esencial-alumbrado/visible-light>
- Scotto, F., & Chech, M. (2008). *Manual de producción de quinua orgánica*. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de http://balcon.magap.gob.ec/mag01/magapaldia/Quinua/pdf%20publicaciones/21-Manual_%20Organica_Quinua12.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural. (2013). *El Suelo y la Agricultura*. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de http://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/eam/ver_ecotecnia/11
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo [SENPLADES]. (2012). *Folleto informativo: Transformación de la Matriz Productiva. Revolución productiva a través del conocimiento y el talento humano*. Recuperado el 19 de diciembre de 2016, de <https://goo.gl/nSVN0N>
- Sendra, F. (2008). *Radiación Ultravioleta*. Recuperado el 28 de Julio de 2017, de Red de Salud de Cuba: <http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-fis/ultravioleta-morrillo.pdf>

- Sendra, F., & Martinez, M. (2008). *Radiación Infrarroja*. Recuperado el 28 de Abril de 2017, de Red de Salud de Cuba:
http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-fis/radiacion_infrarroja.pdf
- SerSol. (2015). *Ventajas y desventajas de la agricultura de precisión*. Recuperado el 18 de Junio de 2017, de <http://www.sersolcampo.com/ventajas-y-desventajas-de-la-agricultura-de-precision/>
- Servicios Agropecuarios de la Costa S.A. (2015). *Tipos de cultivo, ciclos y estacionalidad*. Recuperado el 05 de Septiembre de 2017, de <http://www.gruposacsa.com.mx/tipos-de-cultivo-ciclos-y-estacionalidad/>
- SIGTIERRAS. (2010). *Ortofotomosaico escala 1:5000*. Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador.
- Sims, D., & Gamon, J. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81, 337-354. Recuperado el 29 de Noviembre de 2016
- Sims, D., Luo, H., Hastings, S., Oechel, W., Rahman, A., & Gamon, J. (2006). Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO₂ exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 103, 289-303. Recuperado el 29 de Noviembre de 2016, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706001313>
- Sobrino, J. (2001). *Teledetección*. Valencia, España: Universitat de Valencia. Recuperado el Julio de 26 de 2017, de https://books.google.com.ec/books?id=Yb6xIldfoT0C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Talleres Divassón. (2014). *Maquinaria: Subsolador Gascón*. Recuperado el 06 de Septiembre de 2017, de <http://talleresdivasson.com/home/product/subsolador-gascon/>
- Topoequipos S.A. (2017). *Sistema de Posicionamiento Global*. Recuperado el 06 de Octubre de 2017, de <http://www.topoequipos.com/dem/ques/terminologa/que-es-un-gps>
- Trejo, M., Zermeño, J., Olague, J., Aldaco, R., Fortis, M., Salazar, E., . . . Vázquez, C. (2006). Efecto de la densidad y estructura del dosel de maíz en la penetración de la radiación solar. *Revista Internacional de Botánica Experimental*, 75, 47-53. Recuperado el Agosto de 31 de 2017, de https://www.researchgate.net/profile/Cirilo_Vazquez-Vazquez/publication/242420116_Efecto_de_la_densidad_y_estructura_del_dosel_de_maiz_en_la_penetracion_de_la_radiacion_solar/links/542384c20cf238c6ea6e42c0/Efecto-de-la-densidad-y-estructura-del-dosel-de-m

- Trimble. (2017). *Support Trimble R8 GPS Receiver*. Recuperado el 28 de Agosto de 2017, de http://www.trimble.com/support_trl.aspx?Nav=Collection-19571&pt=Trimble%20R8%20GPS%20Receiver
- UAV SenseFly. (2017). *Especificaciones técnicas - Parrot Sequoia*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2017, de http://www.uavsensefly.cl/PDF/Ficha_Tecnica_Sequoia_V2.pdf
- Universidad Autónoma de México [UNAM]. (2007). *Diseño de experimentos*. Recuperado el 28 de Agosto de 2017, de http://telpochcalli.fquim.unam.mx/public_html/domingoa/NOTAS_2_DISEÑO_DE_EXPERIMENTOS_2007
- Universidad de Navarra. (2015). *Morfología: Inflorescencia*. Recuperado el 09 de Septiembre de 2017, de <http://www.unavarra.es/herbario/htm/inflorescencia.htm>
- Universidad Rafael Urdaneta [URU]. (2017). *Principios básicos del Diseño Experimental*. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de <http://www.uru.edu/fondoeditorial/libros/pdf/manualdestatistix/cap1.pdf>
- UNNE. (2011). *Principios de fotogrametría*. Recuperado el 17 de Octubre de 2017, de <http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte01/fotom.pdf>
- Villacrés, E., Peralta, E., Egas, L., & Mazón, N. (2011). *Potencial agroindustrial de la quinua*. Boletín Divulgatorio No. 146, INIAP - Estación Experimental Santa Catalina, Departamento de Nutrición y Calidad de los Alimentos, Quito. Recuperado el 30 de diciembre de 2016, de <https://goo.gl/RZKfyQ>
- Villaverde, M. Y. (2017). *Cálculo de biomasa aérea y carbono capturado de la reserva Yanacocha a través de imágenes satelitales*. Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., & Bastiaanssen, W. (2002). *Surface Energy Balance Algorithms for Land*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2016, de <https://goo.gl/753Fkz>
- Yates, H., Tarpley, J., Schneider, S., McGinnis, D., & Scofield, R. (1984). The role of meteorological satellites in agricultural remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 14, 219-233. Recuperado el 28 de Septiembre de 2017, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425784900178>