



Análisis espectral y estadístico del estudio comparativo entre sensores activos y pasivos para el cálculo de biomasa e índices espectrales del cultivo de cebada (*Hordeum Vulgare*) en la Hacienda El Prado.

García Lima, Erika Estefanía y Montoya Ayala, Karen Jeaneth

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa y del Medio Ambiente

Ing. Sinda González, Izar

30 de marzo del 2021



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Tesis Garcia_Montoya.docx (D97800154)
Submitted: 3/10/2021 3:53:00 AM
Submitted By: iisinde@espe.edu.ec
Significance: 1 %

Sources included in the report:

Tesis JohanaTelloErikaSimbana.docx (D62299451)
TITULACION 1karikevin.docx (D77260690)
TESIS FINALtapiagomezsa.docx (D77272180)
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15850/1/T-ESPE-040770.pdf>

Instances where selected sources appear:

6

.....
Ing. Sinde González Izar
Director



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Análisis espectral y estadístico del estudio comparativo entre sensores activos y pasivos para el cálculo de biomasa e índices espectrales del cultivo de cebada (*Hordeum Vulgare*) en la Hacienda El Prado**” fue realizado por las señoritas **García Lima, Erika Estefanía** y **Montoya Ayala, Karen Jeaneth** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 30 de marzo del 2021.

Firma:

.....
Ing. Sinda González Izar
C. C. 1756491278



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

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotras, **García Lima, Erika Estefanía y Montoya Ayala, Karen Jeaneth**, con cédulas de ciudadanía n° 1723216873 y n°1719114017, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis espectral y estadístico del estudio comparativo entre sensores activos y pasivos para el cálculo de biomasa e índices espectrales del cultivo de cebada (*Hordeum Vulgare*) en la Hacienda El Prado** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 30 de marzo del 2021.

Firma

.....
García Lima, Erika Estefanía
C.C.: 1723216873

Firma

.....
Montoya Ayala, Karen Jeaneth
C.C.: 1719114017



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

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotras, García Lima, Erika Estefanía y Montoya Ayala, Karen Jeaneth, con cédulas de ciudadanía n° 1723216873 y n°1719114017, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis espectral y estadístico del estudio comparativo entre sensores activos y pasivos para el cálculo de biomasa e índices espectrales del cultivo de cebada (*Hordeum Vulgare*) en la Hacienda El Prado** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 30 de marzo del 2021.

Firma

.....
García Lima, Erika Estefanía
C.C.: 1723216873

Firma

.....
Montoya Ayala, Karen Jeaneth
C.C.: 1719114017

Dedicatoria

Con mucho amor dedico este trabajo a mi familia, que me ha enseñado qué es el verdadero amor y apoyo incondicional, la culminación de esta meta también es de ustedes.

Y a todas las personas que de cualquier manera ayudaron a la culminación de esta meta, ya sea con sus conocimientos, o con una palabra de ánimo, gracias de todo corazón, nunca los olvidaré.

Erika García

Dedicatoria

Este trabajo dedico a mis padres, que me apoyaron incondicionalmente durante todo este camino, dándome palabras de ánimo, y haciéndome pisar la tierra cuando lo necesitaba, todos mis logros son gracias a ustedes.

A mis abuelitos, que siempre han estado para mí, apoyándome en todo desde que tengo memoria, los admiró mucho y gracias por darme ese ejemplo de trabajo duro, y por todo el amor a la familia.

A mi hermano Alejandro y mi primo Esteban, que más que primo eres mi hermano, gracias por su apoyo, por estar conmigo toda mi vida, por las peleas y las risas, porque han influido en mi vida y me han dado ese deseo por superarme.

A mis dos tías pequeñas, que siempre han sido como mis hermanas, gracias por ser mi ejemplo a seguir, por haberme enseñado tantas cosas, la persona que soy ahora es gracias a ustedes.

Y finalmente dedicó este trabajo a toda mi familia en general, por siempre apoyarme, estar ahí cuando se los necesita y todo el amor que me han brindado.

Karen Montoya

Agradecimiento

A Dios por permitirme conocerle y confiar en Él en cada paso de mi vida, sin Él nada de esto tendría sentido, gracias por hacerme llegar al final de esta meta, toda la gloria y honra sea para Él.

A mi familia, a mi padre por ser mi ejemplo a seguir, tan cariñoso y bondadoso, a mi hermana Lu y su esposo, gracias por todo el apoyo y por ser el ejemplo de lo quiero llegar a ser, a mis hermanos Santi y Marce, a su hija Dani y esposa Jessy gracias por regalarme tantas alegrías y grandes momentos. A mi abuelita, a mi tía Nancy gracias por ser como mi segunda madre y a ti Majo gracias por ser como mi hermana mayor y apoyarme en mis más grandes locuras.

A todos los maestros que conocí, en especial quiero agradecer a mi tutor de tesis Ing. Izar Sinde, por motivarnos en cada paso de este largo proyecto llamado tesis, por compartir todo su conocimiento con nosotras y gracias por ser un excelente profesor y ser humano, también un agradecimiento especial al Ing.

Pérez docente del IASA que nos permitió el acceso a la zona de estudio.

A mi compañera de tesis y amiga Karen, gracias por toda la dedicación y esfuerzo que pusiste, no pude conseguir mejor compañera que tú para realizar este proyecto.

A mis amigas de toda la vida Samy, Wendy, Daya y Cris gracias de verdad por regalarme su amistad, hemos crecido juntas y no puedo imaginarme mi vida sin ustedes.

A todas las personas que conocí en este viaje llamado universidad, Pame, Ivoncita, mis primeras amigas de la universidad, gracias por regalarme tantos consejos y buenos momentos, a Paul, por ser la persona que siempre me escuchaba, y ser la persona que alumbraba mis días oscuros de la universidad, a Lii, Les, Kathy y Tamy, mis chicas y futuras colegas les agradezco por levantarme los ánimos cuando estaba a punto de renunciar, y a todas las personas que conocí en esta carrera que aunque no las mencioné, están en mi corazón y me llevo grandes experiencias compartidas con ustedes...

Erika García

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme llegar tan lejos, por darme fuerza y fortaleza para seguir adelante y superar todas las dificultades.

Agradezco a mi familia por todo su apoyo, por haber estado en este largo y arduo camino junto a mí, por aguantar mis malos humores y por haberme dado ánimos siempre para seguir adelante.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y a todos los docentes, que impartieron su conocimiento y sabiduría durante todo este camino.

Al Ing. Izar Sinde, por haber sido un excelente profesor y sobretodo una excelente persona, que siempre estuvo presto para resolver dudas y ayudar a todos sus estudiantes. Al Ing. Pérez quien nos permitió el acceso al IASA para poder desarrollar este trabajo.

A Lenin, mi casualidad más bonita, por siempre estar para mí en las buenas y malas, por siempre brindarme su apoyo incondicional, por todo el amor, por ser un pilar fundamental en mi vida y por ser incondicional conmigo.

A mi querida amiga Kimmy, que a pesar de estar tan lejos, ha sido una fuente muy importante de apoyo en mi vida, siempre ha estado para escucharme, para hablar de todo y nada a la vez, y para obligarme a ver doramas.

A Yomy y Joss, mis queridas mosqueteras, que estuvimos juntas desde primer semestre hasta el último semestre, gracias por todas esas horas de estudio, risas y chisme, por toda la ayuda que me brindaron en su momento, por apoyarme y por siempre escucharme. A todas las amigas que hice a lo largo de la universidad, que de una u otra manera me apoyaron e influenciaron toda mi vida universitaria.

Y finalmente pero no menos importante agradezca a mi compañera de tesis y amiga Eri, que estuvimos juntas desde primer semestre, gracias por aguantarme, por estar para mí cuando lo necesitaba, por haberme escuchado y por haber hecho la tesis conmigo.

Karen Montoya

Índice de Contenido

Urkund.....	2
Certificado del director del trabajo de titulación	3
Autoría de responsabilidad	4
Autorización de publicación de la ESPE	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	8
Índice de Contenido	10
Índices de Tablas	14
Índices de Figuras	17
Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo 1.....	21
Antecedentes	21
Estudios relacionados.....	23
Planteamiento del problema	24
Justificación e importancia	24
Descripción del área de estudio.....	25
Objetivos generales y específicos	26
<i>Objetivo General.....</i>	<i>26</i>
<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>26</i>
Metas.....	27
Capítulo 2.....	28
Marco Teórico	28
Teledetección	28
Espectro electromagnético	29

	11
Índices de vegetación	31
Agricultura de precisión.....	36
<i>Cultivo de cebada</i>	36
Proceso Fotogramétrico.....	37
<i>Vehículos aéreos no tripulados</i>	38
<i>Cámara multiespectral</i>	39
<i>Sensores de Cultivos</i>	40
Análisis de Varianza.....	41
Prueba Kruskal-Wallis.....	44
Regresión Lineal	44
Biomasa.....	47
Capítulo 3	49
Metodología	49
Materiales y equipos	27
Diseño experimental	27
Captura de los valores de índice de vegetación para la primera y segunda época de siembra con sensor activo	29
<i>Procesamiento de datos</i>	29
<i>Análisis de los datos</i>	30
Generación de índices de vegetación para la primera y segunda época de siembra a partir de las imágenes multiespectrales UAV.....	30
<i>Plan de vuelo</i>	30
<i>Puntos de apoyo fotogramétrico</i>	32
<i>Generación de ortomosaicos RGB Y RGNIR</i>	33
<i>Calibración de ortomosaicos RGNIR</i>	33
<i>Generación de los índices de vegetación</i>	34
Biomasa.....	35

	12
<i>Generación del MDE y MDC</i>	35
<i>Volumen de la unidad experimental</i>	35
<i>Cálculo del Factor de Densidad (FD) para cada parcela</i>	35
<i>Estimación de biomasa por parcela</i>	35
Análisis estadístico.....	35
<i>Análisis de varianza (ANOVA)</i>	35
<i>Prueba Kruskal-Wallis</i>	36
<i>Regresión Lineal</i>	37
Capítulo 4	38
Resultados y discusión	38
Análisis estadístico del sensor de mano GreenSeeker para la primera y segunda época de siembra.....	38
<i>Análisis de varianza de NDVI por variedades</i>	38
<i>Análisis de varianza de NDVI por estados fenológicos</i>	44
Análisis estadístico de los valores de índices de vegetación obtenidos a partir de las imágenes multiespectrales UAV.....	48
<i>Análisis de varianza de NDVI por variedades</i>	48
<i>Análisis de varianza de NDVI por estados fenológicos</i>	55
<i>Análisis de varianza de RVI por variedades</i>	58
<i>Análisis de varianza de RVI por estados fenológicos</i>	66
<i>Análisis de varianza de SAVI por variedades</i>	69
<i>Análisis de varianza de SAVI por estados fenológicos</i>	76
<i>Análisis de varianza de VARI por variedades</i>	80
<i>Análisis de varianza de VARI por estados fenológicos</i>	84
Biomasa.....	88
<i>Cálculo del Factor de Densidad (FD) para cada parcela</i>	88
<i>Cálculo del volumen de la unidad experimental</i>	89

<i>Estimación de biomasa por parcela</i>	91
<i>Regresión lineal</i>	93
Capítulo 5	96
Conclusiones y Recomendaciones	96
Recomendaciones	97
Referencias Bibliográficas	99
Anexos	108

Índices de Tablas

Tabla 1 Proyectos relacionados.....	23
Tabla 2 Propiedades y características de las distintas regiones del espectro electromagnético.....	30
Tabla 3 Características más importantes de los índices utilizados en este proyecto de investigación	31
Tabla 4 Componentes de la prueba estadística ANOVA	43
Tabla 5 Grado de relación según coeficiente de correlación	46
Tabla 6 Diseño experimental	28
Tabla 7 Cronograma para la captura de datos	29
Tabla 8 Especificaciones del plan de vuelo para el dron DJI Mavic PRO	31
Tabla 9 Cronograma para la captura de imágenes	31
Tabla 10 Análisis del NDVI _S de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la primera época de siembra.....	38
Tabla 11 ANOVA del NDVI _S de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la segunda época de siembra	39
Tabla 12 Intervalos de confianza por variedades del índice NDVI _S	40
Tabla 13 Prueba LSD Fisher del índice NDVI _S de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la segunda época de siembra	42
Tabla 14 Prueba LSD Fisher del índice NDVI _S de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra	43
Tabla 15 Análisis del índice NDVI _S entre estados fenológicos de la primera y segunda época de siembra	44
Tabla 16 Intervalos de confianza por estados fenológicos del índice NDVI _S	45
Tabla 17 Prueba Kruskal-Wallis del índice NDVI _S de los estados fenológicos de la primera época de siembra	46
Tabla 18 Prueba Kruskal-Wallis del índice NDVI _S de los estados fenológicos de la segunda época de siembra	47
Tabla 19 Análisis del NDVI _{UAV} de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la primera época de siembra.....	48
Tabla 20 Análisis del NDVI _{UAV} de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la segunda época de siembra	49
Tabla 21 Intervalos de confianza por variedades del índice NDVI _{UAV}	50

Tabla 22 Prueba Kruskal-Wallis del índice NDVI _{UAV} de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra	52
Tabla 23 Prueba LSD Fisher del índice NDVI _{UAV} de las variedades en la etapa fenológica de madurez de la primera época de siembra	53
Tabla 24 Prueba LSD Fisher de índice NDVI _{UAV} de las variedades en la etapa fenológica de madurez de la segunda época de siembra	54
Tabla 25	55
Tabla 26 Intervalos de confianza por estados fenológicos del índice NDVI _{UAV}	56
Tabla 27 Prueba Kruskal-Wallis del índice NDVI _{UAV} de los estados fenológicos de la primera época de siembra	56
Tabla 28 Prueba Kruskal-Wallis del índice NDVI _{UAV} de los estados fenológicos de la segunda época de siembra	57
Tabla 29 Análisis del RVI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la primera época de siembra	59
Tabla 30 Análisis del RVI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la segunda época de siembra	60
Tabla 31 Intervalos de confianza por variedades del índice RVI	61
Tabla 32 Prueba Kruskal-Wallis del índice RVI de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra	62
Tabla 33 Prueba LSD Fisher del índice RVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la primera época de siembra	63
Tabla 34 Prueba LSD Fisher del índice RVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra	65
Tabla 35 Análisis del índice RVI entre estados fenológicos de la primera y segunda época de siembra	66
Tabla 36 Intervalos de confianza por estados fenológicos del índice RVI	67
Tabla 37 Prueba Kruskal-Wallis del índice RVI de los estados fenológicos de la primera época de siembra	67
Tabla 38 Prueba Kruskal-Wallis del índice RVI de los estados fenológicos de la segunda época de siembra	68
Tabla 39 Análisis del SAVI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la primera época de siembra	70
Tabla 40 Análisis del SAVI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la segunda época de siembra	71

Tabla 41	Intervalos de confianza por variedades del índice SAVI.....	72
Tabla 42	Prueba Kruskal-Wallis del índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra	73
Tabla 43	Prueba LSD Fisher del índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la primera época de siembra.....	74
Tabla 44	Prueba LSD Fisher del índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra	75
Tabla 45	Análisis del índice SAVI entre estados fenológicos de la primera y segunda época de siembra	77
Tabla 46	Intervalos de confianza por estados fenológicos del índice SAVI	77
Tabla 47	Prueba Kruskal-Wallis del índice SAVI de los estados fenológicos de la primera época de siembra.....	78
Tabla 48	Prueba Kruskal-Wallis del índice SAVI de los estados fenológicos de la segunda época de siembra	79
Tabla 49	Análisis del VARI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la primera época de siembra.....	80
Tabla 50	Análisis del VARI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la segunda época de siembra	81
Tabla 51	Intervalos de confianza por variedades del índice VARI.....	82
Tabla 52	Prueba LSD Fisher del índice VARI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra	83
Tabla 53	<i>Análisis del índice VARI entre estados fenológicos de la primera y segunda época de siembra</i>	<i>85</i>
Tabla 54	Intervalos de confianza por estados fenológicos del índice VARI	85
Tabla 55	Prueba Kruskal-Wallis del índice VARI de los estados fenológicos de la primera época de siembra.....	86
Tabla 56	Prueba Kruskal-Wallis del índice VARI de los estados fenológicos de la segunda época de siembra	87
Tabla 57	Cálculo del factor de densidad	88
Tabla 58	Cálculo del volumen por variedades para la primera época de siembra.....	89
Tabla 59	Cálculo del volumen por variedades para la segunda época de siembra	90
Tabla 60	Estimación de la biomasa por variedades de la primera época de siembra ..	91
Tabla 61	Estimación de la biomasa por variedades de le segunda época de siembra.	92
Tabla 62	Análisis de regresión lineal entre los índices de vegetación y la biomasa	95

Índices de Figuras

Figura 1	Área de estudio - Campus politécnico Hacienda El Prado – IASA I	26
Figura 2	Componentes de un sistema de teledetección	29
Figura 3	Espectro electromagnético	30
Figura 4	Clasificación de UAVs por el tipo de aeronave y despegue del equipo	39
Figura 5	Metodología	49
Figura 6	Distribución de las parcelas dentro del área de estudio	28
Figura 7	Cámara multispectral Survey 3W RGNIR	30
Figura 8	Distribución de los puntos de control	32
Figura 9	Ortomosaicos.....	34
Figura 10	Distribución de medias para el índice NDVI _S de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la segunda época de siembra ..	42
Figura 11	Distribución de medias para el índice NDVI _S de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra	43
Figura 12	Comportamiento del índice NDVI _S a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo de la primera época de siembra.....	46
Figura 13	Comportamiento del índice NDVI _S a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo de la segunda época de siembra	47
Figura 14	Distribución de medianas para el índice NDVI _{UAV} de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra	52
Figura 15	Distribución de medias para el índice NDVI _{UAV} de las variedades en la etapa fenológica madurez de la primera época de siembra	53
Figura 16	Distribución de medias para el índice NDVI _{UAV} de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra	54
Figura 17	Comportamiento del índice NDVI _{UAV} a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo de la primera época de siembra.....	57
Figura 18	Comportamiento del índice NDVI _{UAV} a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo de la segunda época de siembra	58
Figura 19	Distribución de medianas para el índice RVI de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra	63
Figura 20	Distribución de medias para el índice RVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la primera época de siembra	64

Figura 21 Distribución de medias para el índice RVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra	65
Figura 22 Comportamiento del índice RVI a lo largo del desarrollo fenológico de la primera época de siembra	68
Figura 23 Comportamiento del índice RVI a lo largo del desarrollo fenológico de la segunda época de siembra	69
Figura 24 Distribución de medianas para el índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra	74
Figura 25 Distribución de medias para el índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la primera época de siembra	75
Figura 26 Distribución de medias para el índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra	76
Figura 27 Comportamiento del índice SAVI a lo largo del desarrollo fenológico de la primera época de siembra	79
Figura 28 Comportamiento del índice SAVI a lo largo del desarrollo fenológico de la segunda época de siembra	80
Figura 29 Distribución de medias para el índice VARI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra	84
Figura 30 Comportamiento del índice VARI a lo largo del desarrollo fenológico de la primera época de siembra	86
Figura 31 Comportamiento del índice VARI a lo largo del desarrollo fenológico de la segunda época de siembra	87
Figura 32 Análisis de correlación para la primera época de siembra.....	93
Figura 33 Análisis de correlación para la segunda época de siembra	94

Resumen

La zona de estudio fue dividida en 75 parcelas en las que se sembraron 4 especies de cebada (INIAP, Cañicapa, IASA y Harrison), en donde se realizó la toma de datos durante dos épocas con características climáticas diferentes (húmeda y seca de 5 meses cada una). Para las dos épocas se realizó la captura de los valores de NDVI en el campo mediante un sensor activo (GreenSeeker de Trimble) y un sensor pasivo (UAV con cámara MAPIR 3W RGNIR). Con el UAV se realizaron vuelos durante las dos épocas de siembra en cada uno de sus estados fenológicos y un vuelo antes de la siembra, con esto se obtuvo imágenes que fueron procesadas y corregidas con un software fotogramétrico para obtener ortomosaicos. Con este insumo se pudo calcular los índices de vegetación $NDVI_{UAV}$, SAVI VARI y RVI de toda el área de estudio, después se realizó una extracción por estadística zonal de los valores de píxel de cada parcela, para finalmente obtener los valores de estos índices de cada una de las 75 parcelas. Se estimó el valor de biomasa mediante la diferencia del Modelo Digital de Elevación y el Modelo Digital de Superficie del Cultivo y el factor de densidad, para cada una de las parcelas en los distintos estados fenológicos. Con los valores de los índices de vegetación obtenidos se realizó un análisis de varianza para determinar que variedad de cebada y en que época se alcanzaron mejores resultados. Además, se realizó un análisis de regresión entre los índices de vegetación y biomasa para definir si es factible usarlos en la determinación de biomasa. Finalmente, los resultados indicaron que en la primera época de siembra se obtuvo mayor cantidad de biomasa que en la segunda. El sensor activo fue capaz de distinguir los 4 estados fenológicos en la segunda época de siembra, mientras que el sensor pasivo fue más eficiente para distinguir estados fenológicos tardíos en los índices basados en infrarrojo, y en el índice basado en el rango visible fue capaz de distinguir los estados fenológicos tempranos.

PALABRAS CLAVES:

- **CEBADA**
- **ÍNDICES DE VEGETACIÓN**
- **SENSOR ACTIVO**
- **SENSOR PASIVO**

Abstract

The study area was divided into 75 plots in which 4 barley species were planted (INIAP, Cañicapa, IASA and Harrison), where data was taken during two seasons with different climatic characteristics (wet and dry 5 months each). For both periods, NDVI values were captured in the field using an active sensor (Trimble GreenSeeker) and a passive sensor (UAV with MAPIR 3W RGNIR camera). With the UAV flights were made during the two planting seasons in each of its phenological states and a flight before planting, with these images were obtained that were processed and corrected with a photogrammetric software to obtain orthomosaics. With this input it was possible to calculate the vegetation indices NDVI UAV, SAVI VARI and RVI of the whole study area, then an extraction by zonal statistics of the pixel values of each plot, to finally obtain the values of these indices for each of the 75 plots. The biomass value was estimated by the difference of the Digital Elevation Model and the Digital Crop Area Model and the density factor, for each of the plots in the different phenological states. With the values of the vegetation indices obtained, a variance analysis was performed to determine which variety of barley and at which time the best results were achieved. In addition, a regression analysis was performed between vegetation and biomass indices to define whether it is feasible to use them in the determination of biomass. Finally, the results indicated that in the first planting season more biomass was obtained than in the second. The active sensor was able to distinguish the 4 phenological states in the second planting season, while the passive sensor was more efficient to distinguish late phenological states in infrared-based indices, and in the index based on the visible range was able to distinguish early phenological states.

KEY WORDS:

- **BARLEY**
- **VEGETATION INDICES**
- **ACTIVE SENSOR**
- **PASSIVE SENSOR**

Capítulo 1

Antecedentes

En la agricultura se busca el mayor rendimiento que se pueda obtener logrando mayores beneficios, por lo que ha surgido la agricultura de precisión que es la aplicación de nuevas tecnologías para analizar y satisfacer las necesidades de los cultivos con la finalidad de optimizar y manejar de mejor manera los insumos, para obtener una producción rentable, de cantidad y amigable con el medio ambiente (García & Flego, 2008).

El monitoreo de los parámetros biofísicos desde el dosel del cultivo durante su crecimiento es esencial para comprender las variaciones en el desarrollo del cultivo y su relación con los factores ambientales y las prácticas de manejo (Schirrmann et al., 2016). Uno de los parámetros biofísicos son los índices de vegetación, que utilizan la reflectancia contrastada en las bandas de onda roja y en el infrarrojo cercano, como en el caso del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), este parámetro se puede usar para la estimación de la calidad y cantidad de vegetación, así como para observar el desarrollo de la vegetación en el tiempo (Ghazal et al., 2015).

La biomasa es otro parámetro biofísico que está positivamente correlacionada con el rendimiento del grano y optimización del manejo de muchos cultivos, por lo que resulta beneficioso para los agricultores estimar este parámetro (Bendig et al., 2014). La estimación rápida, precisa y económica de la biomasa aérea del cultivo a escala de granja es crucial para el manejo agrícola de precisión (Niu et al., 2019).

Por tal motivo, en los últimos años se han desarrollado nuevos estudios que han involucrado tecnologías geoespaciales para el análisis de cultivos como es el caso del estudio de Díaz (2015) que mostró la utilidad de los UAS / RPAS, (Sistemas aéreos no pilotados / sistemas aéreos pilotados remotamente) para realizar trabajos de agricultura de precisión, además de ver la gran utilidad de los sistemas de información geográfica al tratar estas imágenes. Para ello realizó un estudio de diferentes índices de vegetación (NDVI, GNDVI, RVI, GVI, NGRDI, RG), a partir de las imágenes aéreas tomadas con cámaras multiespectrales montadas sobre UAS/RPAS, dónde se llegó a la conclusión que mediante la realización de un análisis estadístico de correlación y de

regresión se pudo comprobar la similitud entre una serie de índices como son NDVI, GNDVI, RVI y GVI.

Otro estudio realizado en el año 2019, nos indica que las imágenes multiespectrales tomadas desde vehículos aéreos no tripulados (UAV) pueden evaluar fácilmente los rasgos de índices de vegetación en diversas etapas del crecimiento del cultivo. En ese caso se monitorearon 32 cultivos de trigo a lo largo de su crecimiento usando un sensor multiespectral Parrot Sequoia montado en un UAV, y un sensor portátil Greenseeker, donde se demostró una evaluación exitosa y rápida de NDVI utilizando esta plataforma UAV, ya que se demostró una mayor precisión que para el sensor Greenseeker (Hassan et al., 2019), sin embargo, el sensor Parrot Sequoia tiene un alto costo en comparación de la cámara Mapir 3W RGNIR y al propio sensor Greenseeker, que se utilizará en este estudio.

Bendig et al. (2014), realizó un estudio para la estimación de la biomasa fresca y seca en un sitio de prueba de cebada de verano utilizando la altura de la planta de los modelos de superficie de cultivo (CSM), dónde se encontró una alta correlación entre la altura de la planta de los modelos digitales de cultivo de la biomasa fresca ($R^2 = 0.81$) y la biomasa seca ($R^2 = 0.82$), aunque la principal limitación fue la influencia de las diferencias de alturas que tuvieron en las últimas etapas de crecimiento debido al aplastamiento por el peso de la planta, produciendo alturas de plantas irregulares, los autores afirman que el método tiene potencial para aplicaciones futuras por parte de no profesionales en la parte geoespacial, es decir, agricultores.

El estudio de Gil-Docampo et al. (2020), propuso una metodología para estimar la biomasa de cultivos herbáceos utilizando cámaras ópticas convencionales y fotogrametría de estructura a partir de movimiento (SfM). El método propuesto se basa en la determinación de volúmenes de acuerdo con la diferencia entre un modelo digital de terreno (DTM) y un modelo digital de superficie (DSM) de cobertura vegetal, dónde se demostró que el método es escalable a múltiples tipos de plataforma y sensores.

Otros estudios para determinar la biomasa utilizan métodos destructivos, o en otros casos se usan estimadores como la altura de la planta, ésta es medida comúnmente con una regla o usando un medidor de placa ascendente (Possoch et al., 2016), también se puede usar escaneo láser terrestre (TLS), pero el equipo representa

un alto costo, y también emplea mucho tiempo, al igual que los métodos basados en tierra, cuya desventaja es que solo pueden usarse en las partes accesibles de un campo (Tilly et al., 2014); es decir que a pesar de que estas técnicas han demostrado buenos resultados para la estimación de la biomasa, se necesita una alta densidad de medición para reflejar los patrones espaciales dentro del campo, que generalmente hacen que estos métodos sean intensivos en mano de obra (Moeckel et al., 2017).

Estudios relacionados

Utilizando la agricultura de precisión se pueden obtener beneficios económicos, medioambientales y de producción. La variación de las condiciones del suelo y del cultivo, combinada con la llegada de tecnologías como los sistemas de navegación global por satélite (GNSS) y los sistemas de información geográfica (SIG), son los principales impulsores para el desarrollo de esta actividad, es por eso que se han desarrollado varios estudios sobre el tema como los que se indican en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Proyectos relacionados

Autores	Tema	Año de Publicación
Muhammad Adeel Hassan, Mengjiao Yang, Awais, Rasheed, Guijun Yang, Matthew Reynolds, Xianchun Xia, Yonggui Xiao, Zhonghu He	A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield prediction using a multi-spectral UAV platform	2019
Juliane Bendig, Andreas Bolten, Simon Bennertz, Janis Broscheit, Silas Eichfuss y Georg Bareth.	Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging.	2014
M. L. Gil-Docampo, M. Arza-García, J. Ortiz-Sanz, S. Martínez-Rodríguez, J.	Above-ground biomass estimation of arable crops	2020

Autores	Tema	Año de Publicación
L. Marcos-Robles y L. F. Sánchez-Sastre.	using UAV-based SfM photogrammetry	

Planteamiento del problema

En el Ecuador los agricultores se encuentran desinteresados en sembrar cebada, pues no tienen las herramientas geoespaciales por su elevado costo para monitorearlo en cada etapa y así evitar pérdidas económicas (BCE, 2019). Sin estas herramientas geoespaciales el monitoreo del cultivo se dificulta, debido a que se necesita mucho tiempo y recursos (Moeckel et al., 2017). Esto ha provocado que la producción de cebada no cumpla con las necesidades que tiene el país, lo que ocasiona que se tenga que importar de otros países (BCE, 2019). En ese sentido, en este proyecto se propone aportar una alternativa al agricultor para caracterizar parámetros biofísicos como son la biomasa y el uso de índices de vegetación como: NDVI, SAVI, VARI y RVI, a partir del uso de sensores activos y pasivos de bajo costo. Otros alcances de este proyecto es dar a conocer qué variedad de cebada se adaptó mejor a las condiciones edafoclimáticas y en qué época tuvo mejores resultados, para poder evaluar qué sensor de bajo costo permitirá cuantificar estos parámetros de forma eficiente; con el fin de difundir estas tecnologías geoespaciales para ayudar al agricultor en el monitoreo de este cultivo tan importante.

Justificación e importancia

La cebada es uno de los cultivos más antiguos del mundo y hoy representa el cuarto cereal más abundante en área y tonelaje cosechado a nivel mundial (Mayer et al., 2012). Del total de cebada cultivada, el 75% se utiliza para la alimentación animal, el 20% es utilizado para bebidas alcohólicas y no alcohólicas, y el 5% como ingrediente de algunos alimentos (Ullrich, 2010). Como resultado la cebada sigue siendo una fuente importante de alimento en países pobres (Grando & Gomez, 2005) y ha sido clasificada como un verdadero alimento funcional, debido a que el grano de cebada es particularmente alto en fibra dietética soluble (Collins et al., 2010).

En el Ecuador se estima que en los últimos años la producción de cebada no ha tenido un aumento significativo porque en el año 2016 se produjeron 25 414 toneladas

de cebada, mientras que en el año 2018 este valor disminuyó a 13 674 toneladas de producción (FAOSTAT, 2019), esto ocasiona que se importe un total de 30 000 toneladas métricas de cebada provenientes de Argentina (BCE, 2019).

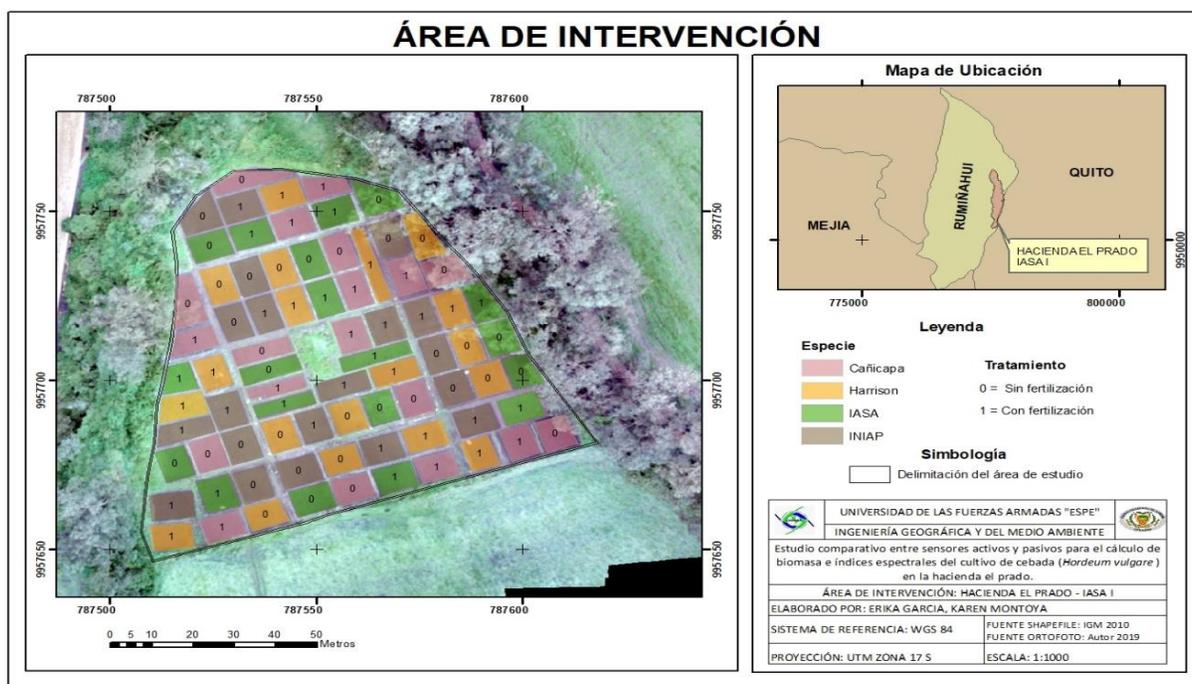
Por los motivos antes mencionados, es necesario que el agricultor tenga más alternativas que sean asequibles para el estudio del comportamiento del cultivo, como la utilización de los índices de vegetación (NDVI, SAVI, VARI y RVI) o la estimación de biomasa de cultivos de cebada, por lo que se propone en este estudio, comparar los resultados entre el sensor pasivo y sensor activo, y determinar que variedad y en qué época se alcanzó los mejores resultados. Además de demostrar que estas herramientas geoespaciales pueden ser muy útiles en otras áreas de conocimiento, y con esto influenciar a los alumnos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE a que realicen más estudios en el área de la agricultura de precisión.

Descripción del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la provincia de Pichincha, cantón Rumiñahui, a 40 Km de la ciudad de Quito, en el campus politécnico Hacienda El Prado IASA I perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, esta zona tiene una superficie de 8.335 m². En la **Figura 1** se indica la distribución de las parcelas en las que fueron sembradas las cuatro especies de cebada: INIAP (1376,37 m²), IASA (1388,32 m²), Cañicapa (1486,86 m²) y Harrison (1428,02 m²); con su respectivo tratamiento que consiste en el uso y no uso del fertilizante (N₅₀K₈₀P₇₀ kg/ha), durante las dos épocas de siembra del ciclo completo del cultivo.

Figura 1

Área de estudio - Campus politécnico Hacienda El Prado – IASA I



Objetivos generales y específicos

Objetivo General

Analizar estadísticamente los índices de vegetación y biomasa, de 4 especies de cebada, con diferentes tratamientos de fertilización, durante dos épocas de siembra, seca y húmeda, mediante el uso del sensor activo portátil de cultivo GreenSeeker y el sensor pasivo UAV con cámara Mapir 3W RGNIR, comparando sus resultados para monitorear el crecimiento de la cebada en el ciclo completo del cultivo en la Hacienda El Prado.

Objetivos específicos.

- Recopilar, estandarizar y procesar los datos obtenidos durante dos épocas de siembra de las 4 especies de cebada, con 2 diferentes tratamientos de fertilización, del ciclo completo del cultivo, mediante el uso de un sensor pasivo y un sensor

activo, para obtener información a detalle y generar ortomosaicos de la zona de estudio.

- Obtener los valores de los índices de vegetación (NDVI, SAVI, VARI, y RVI) a partir de los datos estandarizados y procesados para demostrar estadísticamente que variedad de cebada y en qué época de siembra se alcanzó un mejor desarrollo.
- Estimar la biomasa por parcela, mediante el cálculo de volúmenes entre Modelo Digital de Elevación y Modelo Digital de Superficie del Cultivo y el establecimiento de factores de densidad para cuantificar el desarrollo del cultivo.
- Estimar la relación que existe entre el valor de biomasa, SAVI, VARI, NDVI_{UAV}, y RVI mediante análisis de regresión para definir si es factible emplear índices de vegetación obtenidos con sensores de bajo costo en la estimación de biomasa.

Metas

- Base de datos del índice espectral NDVI_s de las etapas fenológicas de la cebada durante dos épocas de siembra del ciclo completo del cultivo tomadas con el sensor portátil, para realizar su respectivo análisis estadístico.
- 16 Ortomosaicos, 8 en RGB y 8 RGNIR, de las etapas fenológicas de la cebada durante dos épocas de siembra, para obtener los índices espectrales y los modelos digitales.
- Base de datos de los índices espectrales SAVI, VARI, RVI, y NDVI de las etapas fenológicas de la cebada durante dos épocas de siembra del ciclo completo del cultivo tomadas con el sensor UAV, para realizar su respectivo análisis estadístico.
- Un Modelo Digital de Elevación y un Modelo Digital de Superficie del Cultivo, para obtener el volumen en la estimación de biomasa.
- Tabla de pesos de la biomasa en seco y húmedo para poder obtener el factor de densidad en la estimación de biomasa.
- Un informe estadístico de varianza, regresión y correlación de la información de estudio.

Capítulo 2

Marco Teórico

Teledetección

La teledetección se desarrolla a partir del siglo XX fundamentándose en la mejora de las cámaras fotogramétricas, las posibilidades de la aviación y el desarrollo de los principios de la estereoscopia y su aplicación para el uso de fotografías aéreas con fines topográficos. La Teledetección es la técnica que tiene como fin obtener información de la superficie terrestre, sin estar en contacto directo con ella usando sensores aéreos o espaciales, para su posterior análisis (Pérez & Muñoz, 2006).

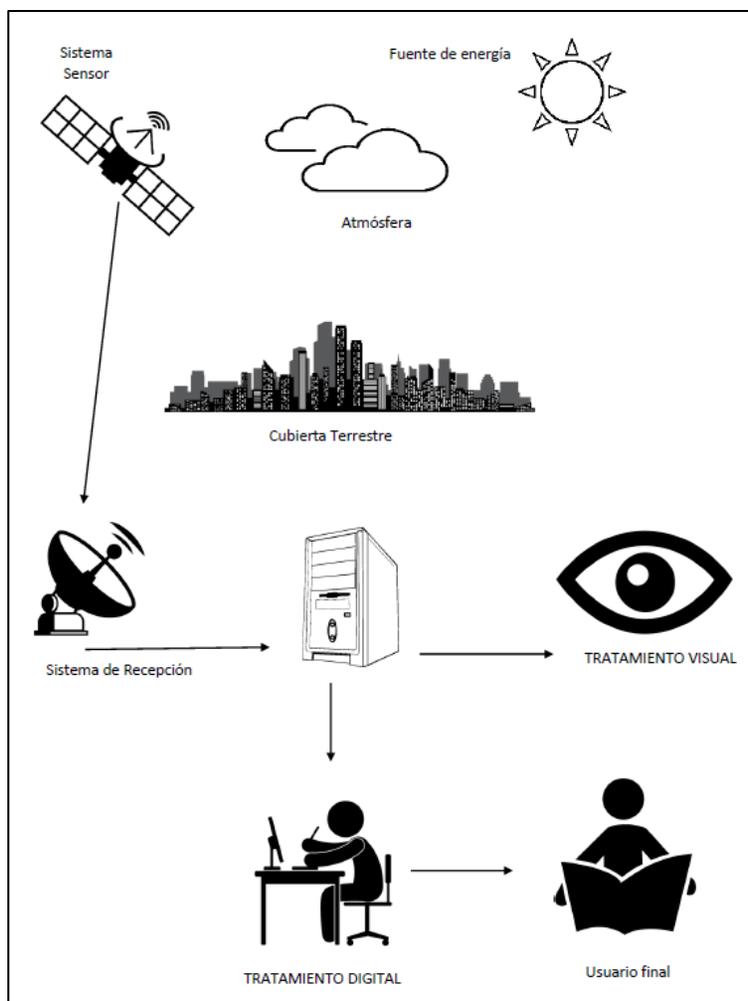
Se diferencian dos etapas en la teledetección: espacial y aérea (Graham & Read, 1990). En la actualidad la brecha entre estas dos etapas de la teledetección ha ido desapareciendo debido a que la teledetección aérea ha incrementado el uso de sensores digitales y la teledetección espacial ha aumentado la resolución, permitiendo visualizar detalles que antes solo se obtenían con las cámaras aeroportadas (Chuvieco, 2008).

Para que exista la teledetección se necesita de diferentes componentes que se relacionen entre sí, como la energía electromagnética y la superficie terrestre, estas serán influenciadas por factores ambientales externos y por las características intrínsecas del medio físico en el momento de la toma de imágenes, porque cada superficie terrestre refleja la energía de manera no homogénea dependiendo de factores físicos, químicos y ambientales (Pérez & Muñoz, 2006). Según Chuvieco (2008) para que exista esta interacción, deben actuar tres elementos: sensor, elemento a observar y flujo energético. El flujo energético puede ser reflexión, emisión, y emisión-reflexión.

En el sistema de teledetección como se observa en la **Figura 2**, el primer componente es una fuente que genere radiación, en la mayoría de los casos es el sol, esta radiación es reflejada por la superficie terrestre hacia sensores que se encuentran en vehículos espaciales, la radiación es convertida en información, la misma que será transmitida a los sistemas de recepción en la Tierra, la información es convertida en imágenes en formato analógico o digital, la misma que será depurada para finalmente ser distribuida a los usuarios finales, quienes podrán analizar y generar resultados como mapas temáticos.

Figura 2

Componentes de un sistema de teledetección



Nota. Modificado de Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio, por Chuvieco, 2008, Ariel Ciencias.

Espectro electromagnético

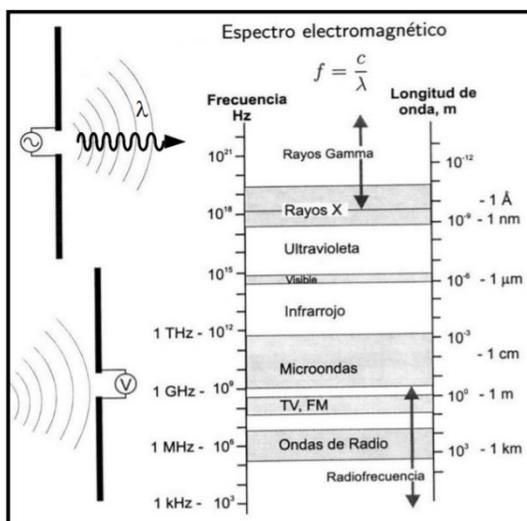
La radiación electromagnética es el flujo de energía de un objeto propagado como ondas electromagnéticas, esta radiación puede tener origen natural o artificial. El conjunto de todas las frecuencias discretas o continuas, que se producen en la radiación electromagnética se llama espectro electromagnético (Luque, 2012).

El espectro electromagnético se divide en diferentes bandas de frecuencia, debido a que las ondas electromagnéticas tienen diferente comportamiento

dependiendo del medio de propagación, la procedencia y la manera de interactuar con la materia. Existen varios criterios para clasificar al espectro electromagnético, una de ellas es la que se visualiza en la **Figura 3** (Luque, 2012).

Figura 3

Espectro electromagnético



Nota. Tomada de Teledetección: Nociones y Aplicaciones, por Pérez & Muñoz, 2006.

Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda, para las más cortas se utilizan micras ($\mu = 10^{-3}$ mm), y para las más largas se miden en centímetros o metros como se detalla en la **Tabla 2**.

Tabla 2

Propiedades y características de las distintas regiones del espectro electromagnético

Rayos cósmicos y Gamma	Menos de 0.0003 mm. Esta radiación es completamente absorbida por la atmósfera superior y no es utilizada en percepción remota.
Rayos X	De 0.0003 a 0.03 mm. Esta radiación es absorbida por los gases atmosféricos, por lo que no se puede utilizar en percepción remota.
Ultravioleta (UV)	De 0.03 a 0.4 mm. Las radiaciones menores de 0.3 mm son completamente absorbida por el ozono de la atmósfera. La región comprendida entre 0.3 y 0.4 mm, denominado ultravioleta fotográfico, es usada en percepción remota. Esta radiación es detectable con películas y fotodetectores, aunque se ve afectado severamente por la dispersión atmosférica.

Visible (VIS)	De 0.4 a 0.7 mm. Es detectable con película fotográfica y fotodetectores. Es el rango de acción de la fotografía convencional. Es la más utilizada en percepción remota, pues es la única región que es sensible el ojo humano.
Infrarrojo cercano y medio	De 0.7 a 3 mm. Es energía reflejada y no proporciona información sobre la energía térmica del objeto. Dentro de este se encuentra el límite de los sistemas fotográficos (0.9 mm). Muy importante en los estudios de vegetación.
Infrarrojo termal	De 3 a 14 mm. Se divide en dos intervalos: de 3 a 5 y de 8 a 14 mm. Proporciona información sobre las propiedades térmicas de los objetos.
Micro-ondas	De 0.3 a 300 cm. Estas radiaciones pueden penetrar nubes y niebla y son usadas en sensores activos de los cuales el más conocido es Radar.
Longitudes de ondas superiores	Se utilizan en transmisiones de radio y redes eléctricas de corriente alterna. No tienen aplicación actual en la percepción remota.

Nota. Tomado de Técnicas de muestreo para manejadores “El espectro electromagnético”: Introducción a la percepción remota, por González, 2004, Blanca.

Índices de vegetación

Los índices de vegetación (IV) se calculan a partir de los valores de reflectividad a diferentes longitudes de onda para obtener información de la vegetación, disminuyendo factores como propiedades ópticas del suelo, la irradiancia solar, etc. Las bandas que generalmente se utilizan para obtener información espectral de una cubierta vegetal son las bandas roja e infrarroja próxima (Sobrino et al., 2000). En la **Tabla 3** se indican características importantes de los índices NDVI, VARI, SAVI y RVI.

Tabla 3

Características más importantes de los índices utilizados en este proyecto de investigación

Índice de vegetación	Características más relevantes
NDVI	La normalización que realiza reduce el efecto de la degradación de calibración del sensor y la influencia de los efectos atmosféricos, además que presenta una sencillez matemática.
VARI	Es mínimamente sensible a los efectos atmosféricos, las bandas utilizadas han sido seleccionadas por su sensibilidad a la fracción verde.

Índice de vegetación	Características más relevantes
SAVI	Minimiza el efecto de la reflectividad del suelo.
RVI	Poco sensible a las condiciones de iluminación, pero es bastante sensible a las propiedades ópticas de la Tierra.

Nota. Tomado de Teledetección, por Sobrino et al., 2000, Sobrino, J.A., y tomado de Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction por Gitelson et al., 2002, International Journal of Remote Sensing.

- **NDVI**

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI) permite determinar la vigorosidad de una planta debido a que mide la fracción de radiación fotosintética activa, se relaciona con la biomasa, productividad de la vegetación y el índice de área foliar (Fu & Burgher, 2015; Yengoh et al., 2016). Encargado de minimizar los efectos topográficos y atmosféricos, debido a que reduce el efecto de la degradación de calibración del sensor (Rouse et al., 1974). Se expresa como la relación entre la diferencia y la suma de la reflectancia espectral obtenida en las regiones infrarrojo cercano y visible roja, como se muestra en la ecuación (1), en el visible rojo los pigmentos absorben la energía y en el NIR las hojas que se encuentren llenas de agua reflejan la mayor cantidad de energía (Rouse et al., 1974; Gascon et al., 2016)

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R} \quad (1)$$

Donde:

IR: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie en la banda del infrarrojo cercano del espectro electromagnético.

R: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie de la banda del rojo del espectro electromagnético.

Este índice tiene una escala de medición entre -1 a 1, que permite establecer rangos y comparar imágenes, por estos motivos es el más utilizado para todo tipo de estudios que involucren vegetación. Los valores inferiores a 0 representan zonas sin vegetación como agua, hielo y áreas rocosas, arenosas o nevadas, mientras que valores positivos más altos representan áreas con vegetación con mayor contenido de

clorofila, y los valores positivos más bajos representan áreas con vegetación con menor cantidad de clorofila (Muñoz, 2013).

Este índice se lo ha utilizado en el control de riego y enfermedades de cultivos agrícolas, mediante el uso de aeronaves no tripuladas, el índice NDVI y el software AgVault se identificó los sectores del cultivo que necesitan más riego y otros solo control, el resultado es una colección de imágenes que al momento de interpretarlas y examinarlas se evidenció los posibles problemas para efectuar su remediación (Caballero, 2017).

Otro estudio en el que se aplicó este índice fue para el cultivo de papa, en dónde se encontró que en zonas de índices medios y bajos (0.2 a 0.6), era notorio algún problema de desarrollo en el cultivo o la presencia de vegetación invasiva. Los resultados indican que este índice permitió identificar características de la vegetación y problemas en el cultivo, demostrando que esta herramienta tecnológica es una alternativa para pequeños y grandes agricultores (Berrío et al., 2018).

- **RVI**

El índice RVI (Ratio Vegetation Index) está relacionado con el contenido de agua de la vegetación, el índice de área foliar y el NDVI, siendo efectivo para estimar el contenido de agua de la vegetación y la cantidad de humedad del suelo (Kim et al., 2011). Pearson & Miller (1972), proponen este índice relacionando el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del rojo, como se indica en la ecuación (2):

$$RVI = \frac{IR}{R} \quad (2)$$

Donde:

IR: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie en la banda del infrarrojo cercano del espectro electromagnético.

R: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie de la banda del rojo del espectro electromagnético.

El estudio del RVI como alternativa al NDVI para monitorear soya y algodón dio como resultado que el RVI puede ser utilizado en lugar del NDVI para monitorear cultivos durante toda la temporada húmeda ya que el RVI no se satura como el NDVI,

sin embargo, el RVI no puede representar el verdor. También se concluyó que el RVI puede ser usado para modelos de humedad del suelo en campos con vegetación donde el NDVI es crítico (Kumar, et al., 2013)

En otro estudio se utilizaron imágenes satelitales tomadas en una sola fecha y archivadas en QuickBird de cultivos de palma de aceite recogidos durante una serie temporal de 12 años a fin de generar modelos de productividad en Malasia, los modelos se construyeron usando el índice RVI y el MSAVI y donde estos dos índices demostraron tener una relación fuerte entre productividad estimada y la observada, en conclusión se puede decir que los resultados de este estudio sugieren que los índices de vegetación seleccionados de QuickBird sirven para estimar la productividad de la palma de aceite con una precisión confiable (Balasundram et al., 2013).

- **SAVI**

El índice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) es más utilizado en zonas semiáridas, porque reduce el efecto de la reflectividad del suelo, permitiendo aislar la información que aporta la vegetación, este índice es la corrección de la radiancia del suelo del NDVI mediante la introducción del factor L (ver ecuación 3), constante para ajustar las diferencias que existen entre la vegetación y el suelo origen. L puede tomar valores de 0 a 1, esto dependerá de la densidad de la vegetación, para densidades bajas se aplica valores más altos, en densidades intermedias L toma el valor de 0.5 (Huete, 1988).

$$SAVI = \frac{IR-R}{IR+R+L} (1 + L) \quad (3)$$

Donde:

IR: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie en la banda del infrarrojo cercano del espectro electromagnético.

R: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie de la banda del rojo del espectro electromagnético.

L: puede tomar valores entre 0 y 1

En el estudio del Análisis espacio-temporal de la vegetación por índices de vegetación a partir de imágenes satelitales de fechas múltiples: aplicación a un área semiárida en ARGELIA, con el índice SAVI se obtuvo una mejora en la expansión

espectral en comparación con el NDVI y TVI, debido a que el SAVI se utiliza para reducir la contribución espectral del suelo para la cobertura vegetal baja por clorofila en esta región semiárida (Fatiha, et al., 2013).

En la región oriental de los Emiratos Árabes Unidos, la vegetación se ha ido disminuyendo debido a la salinización de las aguas subterráneas, por tal motivo se realizó un estudio para evaluar estos cambios, con la obtención de imágenes TM (Thematic Mapper) y ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) se pudo observar las anomalías del verdor mediante el cálculo del índice de vegetación SAVI, ya que los valores de SAVI disminuyeron con el aumento de la salinidad del suelo, lo que permitió identificar las áreas afectadas por la sal (Alhammadi, M. & Glen, E., 2008).

- **VARI**

(Visible Atmospherically Resistant Index) VARI fue diseñado para introducir una corrección atmosférica y es un buen índice para estimar la fracción de vegetación del rango visible del espectro. Este índice se puede utilizar en los cultivos en todas las etapas de crecimiento. Para calcular el valor de VARI, se utiliza la ecuación (4) propuesta por Gitelson et al., (2002):

$$VARI = \frac{(G-R)}{(G+R+B)} \quad (4)$$

Donde:

R: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie de la banda del rojo del espectro electromagnético.

G: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie de la banda del verde del espectro electromagnético.

B: valores de reflectancia o radiancia espectral de la superficie de la banda del azul del espectro electromagnético.

El índice VARI fue utilizado en la Propuesta metodológica para la generación de la línea base en la pronta detección de pudrición de cogollo y anillo rojo en palma aceitera mediante tecnologías geoespaciales, en la que se determinó que el índice que mejor se acopla para realizar una evaluación multitemporal del comportamiento de las afectaciones de pudrición de cogollo y anillo rojo fue el VARI, que detectó cambios en los niveles de vigorosidad (Viera, 2019).

Se ha estudiado la relación que puede tener el índice de vegetación VARI con la fracción de cubierta vegetal, a partir de datos del Espectrómetro de Imágenes de Alta Resolución Compacto (CHRIS), los resultados obtenidos indican que el índice VARI tiene una buena correlación con el factor de cubierta vegetal, con errores estándar de menos del 8% (Jiménez et al., 2009).

Agricultura de precisión

La agricultura de precisión viene de la idea de emplear los recursos y la cantidad precisas de insumos en el momento correcto y donde se requiere con la finalidad de optimizar la producción, además de vincular al productor con el concepto de sustentabilidad del medio ambiente logrando el cuidado del suelo, utilizando cada vez menos materiales nocivos, para mejorar el rendimiento (Marote, 2010).

La agricultura tradicional usa herramientas de manera homogénea, solucionando los problemas de cultivos basándose en características generales de toda el área de producción, por otro lado, según García & Flego (2008), la agricultura de precisión transforma datos e información en conocimiento y rentabilidad, a través de la capacidad de recopilar, analizar y aplicar información específica. Esta técnica también emplea sistemas de posicionamiento global como la teledetección para tener una cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de los cultivos, de modo que la agricultura de precisión logra satisfacer las necesidades de la producción moderna.

Cultivo de cebada

La cebada pertenece a los cultivos de ciclo corto al igual que el arroz, maíz, soya, papa, ajonjolí, y algodón. Se caracteriza porque su ciclo vegetativo es menor a un año, incluso algunos cultivos pueden durar unos pocos meses, la gran mayoría son cosechados solo una vez, puesto que la planta produce el fruto y al poco tiempo muere (Solis, 2019). La cebada *Hordeum vulgare* L. es uno de los cultivos más antiguos y ha desempeñado un rol muy importante en la agricultura (Ullrich, 2010). En nuestro país el cultivo de cebada se remonta a tiempos de la conquista española, cuando por la necesidad de forraje para alimentar a los caballos fue cultivada con anterioridad al trigo (Coronel & Jiménez, 2011). La cebada es un alimento energético, rico en carbohidratos, especialmente en almidón, además en cuanto a su aporte proteico, es una fuente importante de aminoácidos (Villacrés, 2008).

La cebada presenta 4 etapas fenológicas, y estas son: la germinación que va desde 0 a 10 días, el desarrollo y maco-llamamiento que tiene una duración de 11 a 65 días, la formación de espiga y llenado de grano de 66 a 85 días y, por último, la madurez, que va desde los 85 días hasta los 155 días, el tiempo del ciclo de este cultivo varía de acuerdo a la variedad, y está influenciada por la altitud y las condiciones climáticas. Algunas variedades existentes de cebada son: Atahualpa 92, dorada, I-Calicuchina 91, Riobambeña, Duchicela, I-Shyri 89, I-Cañicapa 2003, I-Pacha 2003, Chilena, Terán 78 y I-Guaranga 2010 (Basantes, 2015; Chicaiza et al., 1990; Chicaiza et al., 1992; Falconí et al., 2011).

Proceso Fotogramétrico

La fotogrametría es la medición de un objeto cualquiera, utilizando fotografías del mismo objeto, pero no siempre tiene como fin la medición, también se la usa para la investigación por medio de fotografías aéreas, constituyendo la llamada fotointerpretación. Según el lugar donde hayan sido tomadas las fotografías, existen dos tipos de fotogrametría: terrestre y aérea (Lehman, 1975).

El proceso fotogramétrico comprende todas las etapas necesarias para realizar cartografía a partir de fotografías aéreas. La primera etapa del proceso es la toma de fotografías del área de estudio y termina cuando se obtienen coordenadas en 3D de esa área, estas coordenadas servirán para crear planos cartográficos, modelos digitales de elevaciones, ortomosaicos. Este proceso incluye trabajo de campo y de gabinete, por lo que los errores y precisiones de cada etapa se acumularán y el resultado final dependerá del desarrollo de cada fase.

El proceso fotogramétrico empieza con la toma de imagen sea cual sea su origen: fotografías aéreas escaneadas, imágenes de satélite capturadas con sensores y por último imágenes digitales capturadas con cámaras digitales. A continuación, es necesario realizar el proceso de orientación interna que consiste en el cambio de coordenadas pixel, es decir de filas y columnas, a coordenadas imagen, usualmente dadas en mm, referidas a un sistema de ejes coordenados cuyo origen está en el centro de proyección. Para ello se trabaja con las marcas fiduciales, las cuales se identifican y localizan (Quirós, 2014).

Luego se realiza una orientación externa, que sirve para relacionar el sistema de coordenadas de la imagen, con el sistema de coordenadas del terreno, en esta orientación se deben considerar 6 parámetros de orientación en cada una de las imágenes de vuelo: coordenadas espacio objeto para centro de perspectiva (X_o , Y_o , Z_o) y los ángulos de rotación de la cámara: omega (Ω), phi (ϕ) y kappa (κ) (Buill et al., 2003).

La aerotriangulación es el proceso que se realiza en un proyecto fotogramétrico con el objeto de reducir el número de puntos de apoyo tomados en campo. En grandes proyectos de fotogrametría el número de puntos de apoyo se incrementa en gran cantidad y el coste de la toma de datos es muy elevado. Mediante la aerotriangulación se reduce el número cuantiosamente (Quirós, 2014).

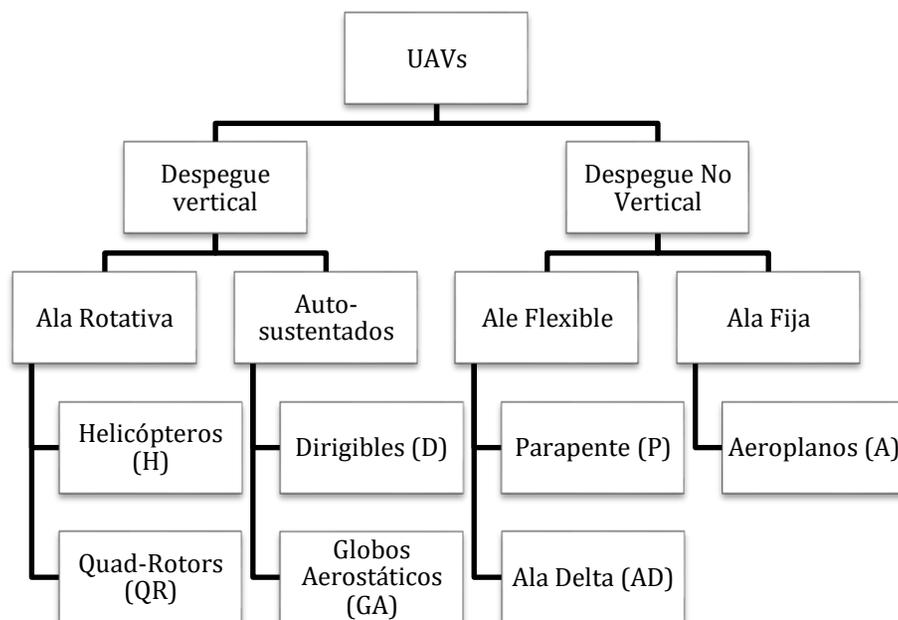
Vehículos aéreos no tripulados

Los vehículos aéreos no tripulados UAV (Unmanned Aerial Vehicle) son aquellos que necesitan de la existencia de un piloto que controle desde tierra sus operaciones (Barrientos et al., 2007). El UAV es una alternativa para la toma de datos en estudios fotogramétricos debido a que se obtienen mejores resoluciones espaciales que en la fotogrametría aeroportada, esto es porque el UAV puede volar a bajas alturas minimizando la interferencia atmosférica, además de tener una resolución temporal alta, por los bajos costos que representa comparado con otras tecnologías (Arriola-Valverde et al., 2018).

Existen muchos criterios para clasificar a los UAV, uno de los más comunes puede ser la clasificación por el tipo de aeronave utilizada para el diseño del vehículo, como se muestra en la **Figura 4**, que puede ser en despegue vertical y no vertical. Dentro del despegue vertical se encuentran los de ala rotativa o hélice (helicópteros o quad-rotors), y los autos sustentados (dirigibles o globos). Por otro lado, los del despegue no vertical son los de ala fija (aeroplanos) y ala flexible (parapente o ala delta) (Barrientos et al., 2007).

Figura 4

Clasificación de UAVs por el tipo de aeronave y despegue del equipo



Nota. Modificado de Estudio y diseño de metodología con técnicas GPS para la actualización de la cartografía catastral del municipio Palavecino (Venezuela), por Camargo, 2011.

Cámara multiespectral

Actualmente la mayoría de los drones que se comercializan ya montan una cámara RGB de serie. Este tipo de cámaras montan un sensor que mide la capacidad de luz dentro del espectro visible, pero existen otro tipo de radiaciones que van más allá del RGB y que son de mucha importancia para la agricultura de precisión. Para poder ver este tipo de radiaciones se necesita de un sensor multiespectral, que se montan a las cámaras multiespectrales. Este tipo de cámaras son capaces de captar la región del rojo (0,68 a 0,75 micras) y el infrarrojo cercano (0,75 a 1,7 micras) que son las bandas de más interés para el sector agrícola (Aerial Insights, 2019).

Las cámaras multiespectrales tienen la capacidad de detectar varios espectros de luz, obteniendo como resultado imágenes multiespectrales, que nos permiten recuperar la radiación espectral de un elemento, reflectancia de un objeto o la señal de color combinada en cada píxel de la imagen (López-Álvarez et al., 2009). Las bandas en

las que captan información estas cámaras son entre 3 y 7, con una longitud de 100 *nm* de ancho, cuyas principales bandas son verde, roja, azul, infrarrojo cercano (Saavedra et al., 2020). Las cámaras multiespectrales tienen diferentes usos, como la detección temprana de falta de nutrientes en los cultivos, un uso adecuado de la cantidad de pesticidas, ubicar zonas con estrés hídrico y estimar la producción de los cultivos (Trueba, 2017).

En el mercado existe una gran variedad de cámaras multiespectrales y de cámaras NIR (*near infrared*), la elección entre una u otra dependerá del uso que se le vaya a dar. Las cámaras multiespectrales más conocidas del mercado son la Parrot Sequoia y la Micasense RedEdge estas capturan la reflectancia de un área muy específica del espectro, por lo que la información es más precisa sobre los cambios sutiles que pueden estar ocurriendo. Otra opción más económica son las denominadas cámaras NIR, son cámaras RGB con la lente modificada que miden grandes fragmentos del espectro de luz, generando un valor promedio de la luz reflejada en esa región y son capaces de captar el infrarrojo cercano, son cámaras mucho más económicas que las cámaras multiespectrales y no de los modelos más utilizados es la Mapir Survey (Aerial Insights, 2019).

Sensores de Cultivos

Los sensores de cultivo son herramientas que permiten realizar mediciones rápidas y precisas, con el fin de facilitar la toma de decisiones óptimas para el manejo de los cultivos (Arnó et al., 2017a). Existen dos tipos de monitoreo en la agricultura de precisión que dependen de la distancia que existe entre el sensor y su objetivo, estos pueden ser proximales o remotos, el monitoreo por sensores remotos es el que se realiza sin contacto con el objeto que se está midiendo, mientras que los sensores de proximidad si necesitan tener contacto con el elemento (Arnó et al., 2017b).

Uno de los sensores disponible en el mercado es el GreenSeeker de la marca Trimble, que es un instrumento que permite medir la luz que reflejan las hojas de los cultivos, obteniendo el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). El análisis de sus resultados sirve para un diagnóstico rápido sobre las condiciones nutricionales, estado fisiológico y el rendimiento de cada cultivo (Lan et al., 2009). Este sensor a comparación con las imágenes aéreas y satelitales provee la información de

una manera más rápida, además que disminuye los costos de producción, facilita localizar las zonas que necesitan más fertilizante y agua (Verhulst et al., 2009).

Análisis de Varianza

ANOVA (Analysis of Variance), es un conjunto de eventos experimentales y procedimientos estadísticos para el análisis de respuestas cuantitativas de unidades experimentales. Existen dos casos de ANOVA, el primero es conocido como unifactorial, de clasificación única o ANOVA unidireccional, y se lo aplica cuando se quiere analizar datos muestreados de más de dos poblaciones o más de dos tratamientos, y el segundo caso de ANOVA es llamado bifactorial que se lo utiliza cuando existen varias situaciones experimentales, es decir, existen dos o más factores que son de interés simultáneo (Devore, 2008). Para poder aplicar esta técnica, será necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- Independencia: los individuos estudiados deben ser independientes unos de otros.
- Aleatoriedad: las muestras o grupos objeto de estudio deben haberse obtenido de forma aleatoria.
- Normalidad: las muestras o grupos analizados deben seguir una distribución normal, por lo menos en la población a la que pertenece la muestra.
- Homocedasticidad: las varianzas de la variable dependiente en los grupos que se comparan deben ser aproximadamente iguales. Es por eso que uno de los pasos previos a la comprobación de la existencia de diferencias entre las medias de varias muestras es determinar si las varianzas en tales muestras son iguales (Ordaz, et al., 2010).

Si existen k grupos de individuos y en ellos se miden una variable cuantitativa, se tienen k medias muestrales. Si se plantea la hipótesis nula que dice que las medias poblacionales son iguales el ANOVA es la técnica que nos permite calcular el p -valor correspondiente, es decir, la probabilidad de encontrar medias muestrales tan diferentes entre sí o aún más diferentes. En el análisis de varianza ANOVA se plantean dos hipótesis como se muestra en la ecuación (5) Si H_0 es cierta se puede decir que las medias muestrales no son muy diferentes, pero si H_1 es cierta se puede decir que las medias muestrales son diferentes (Prieto & Herranz, 2010).

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu \quad (5)$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ par algún } i \neq j$$

Para comprobar dicha prueba se aplicó el estadístico del p -valor, dónde si:

P < Nivel de significancia	Se acepta la hipótesis alternativa.
P > Nivel de significancia	Se acepta la hipótesis nula.

Según Gutiérrez & De la Vara (2012) para demostrar las pruebas de hipótesis planteadas en la ecuación (5) se debe descomponer la variabilidad de los datos a utilizar en los dos elementos que la integran, la variabilidad de los tratamientos y la correspondiente al error aleatorio. Se tiene una medida de la variabilidad total que consiste en la suma de cuadrados que se describe en la ecuación (6).

$$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y^2}{N} \quad (6)$$

En la que $\bar{Y} \dots$ representa la suma de los $N = \sum_{i=1}^{n_i} n_i$ datos en el experimento, de manera que al sumar y restar dentro del paréntesis la media del tratamiento i , (\bar{Y}_i) y desarrollando el cuadrado, la SC_T , se puede abstraer en dos componentes que se pueden apreciar en la ecuación (7).

$$SC_T = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{i..})^2 \quad (7)$$

Donde el primer componente es la suma de cuadrados de los tratamientos (SC_{TRAT}) y el segundo consiste en la suma de cuadrados del error (SC_E). Las ecuaciones necesarias para obtener el estadístico F_0 hasta llegar al p -valor se describe en la **Tabla 4**.

Tabla 4

Componentes de la prueba estadística ANOVA

Fuentes de Variación (FV)	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (gl)	Cuadrados Medios (CM)	Factor de corrección (F ₀)	p-valor
Tratamientos	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^K n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y} \dots)^2 \quad (8)$	$k - 1$	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{gl_{TRAT}} \quad (11)$	$F_c = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E} \quad (13)$	$F > F_c$
Error	$SC_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (9)$	$N - k$	$CM_E = \frac{SC_E}{gl_E} \quad (12)$		
Total	$SC_{TOTAL} = SC_{TRAT} + SC_E \quad (10)$	$N - 1$			

Nota. \bar{Y}_i : Media de las observaciones del i-ésimo tratamiento; $\bar{Y} \dots$: Media global o promedio de todas las observaciones; $N = \sum_{i=1}^K n_i$ observaciones. Tomado de Análisis y diseño de experimentos, por Gutiérrez & De la Vara, 2012, McGraw-Hill.

Una vez realizado el análisis de la varianza, se compara el valor de Fisher teórico con el calculado, si este último resulta ser mayor se acepta la hipótesis alternativa H_1 y se rechaza la hipótesis nula H_0 , comparando las medias de cada tratamiento. Si existe diferencia se puede comprobar a través de la prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia de 5%, usando la ecuación (14) (Contreras & López, 2009).

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2}, N - k} \sqrt{CM_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (14)$$

Donde:

$t_{\frac{\alpha}{2}}$ se lee en la tabla de la distribución T de Student con $N - k$ grados de libertad

CM_E Error medio cuadrado obtenido del análisis ANOVA

n_i y n_j son el número de observaciones para los tratamientos i y j respectivamente

Prueba Kruskal-Wallis

En el caso de que los datos no sigan una distribución normal y no cumplan con la homocedasticidad, se debe recurrir a métodos no paramétricos como la prueba Kruskal-Wallis, que tiene como objetivo probar si un grupo de datos provienen de la misma población, se utiliza para varias muestras independientes, es idéntico a la ANOVA, pero los datos son reemplazados por categorías. Su fórmula es:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (15)$$

Dónde:

n_i : número de elementos de la muestra j

R_i : suma de rangos de todos los elementos de la muestra j

k: número de muestras

N: $n_1+n_2+n_3+\dots+n_k$ número total de observaciones

La hipótesis nula para la prueba de Kruskal-Wallis es que no existe diferencia entre los tratamientos, mientras que la hipótesis alternativa es que exista diferencia entre al menos un par de tratamientos (ecuación 16). En el caso de que el estadístico H sea mayor al nivel de significancia se podrá aceptar H_0 .

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu \quad (16)$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j$$

Regresión Lineal

El principal propósito del análisis de regresión es modelar en forma matemática el comportamiento de una variable de respuesta en función de una o más variables independientes, estos modelos matemáticos ayudan a predecir, optimizar o controlar datos, que pueden obtenerse de experimentos planeados, de observaciones de fenómenos no controlados o de registros históricos (Gutiérrez & De La Vara, 2012).

El objetivo de la regresión lineal es estimar o aproximar el valor de una característica de la variable dependiente, en función de los valores que puede tomar en conjunto cuando intervienen las características de las variables independientes (Moral, 2016). Según Gutiérrez & De La Vara (2012), una manera de estudiar el comportamiento de Y con respecto a X es mediante un modelo de regresión que consiste en ajustar un modelo matemático de la forma:

$$Y = f(x) \quad (17)$$

Con ello, se puede ver si dado un valor de la variable independiente X es posible predecir el valor promedio de Y. Hay que suponer que las variables X y Y están relacionadas linealmente y que, para cada valor de X, la variable dependiente, Y, es una variable aleatoria. Es decir, que cada observación de Y puede ser descrita por el modelo:

$$E(Y|X) = \beta_0 + \beta_1 X \quad (18)$$

en donde b_0 y b_1 son los parámetros del modelo y son constantes desconocidas. Por lo tanto, para tener bien especificada la ecuación que relaciona las dos variables será necesario estimar los dos parámetros, que tienen los siguientes significados: β_0 es el punto en el cual la línea recta intercepta o cruza el eje y, y β_1 es la pendiente de la línea, es decir, es la cantidad en que se incrementa o disminuye la variable Y por cada unidad que se incrementa X.

Métodos de correlación

Existen métodos de correlación como Pearson y Spearman, que se utilizan para representar similitudes y diferencias entre las variables e individuos que permite establecer si es que existe variedad. La correlación de Pearson, mide la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal y caso contrario se utiliza la correlación de Spearman (Mondragón, 2014).

- **Coefficiente de correlación de rangos Spearman (Rho de Spearman)**

Es una medida de asociación lineal que tiene como objetivo utilizar los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos y compara dichos rangos y permite saber la dependencia o independencia de dos variables aleatorias con su grado de asociación (Elorza, 2008).

La fórmula de este coeficiente es (Anderson et al., 2008):

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (19)$$

Siendo:

n= la cantidad de sujetos que se clasifican

xi =el rango de sujetos i con respecto a una variable

yi = el rango de sujetos i con respecto a una segunda variable

di =xi - yi

El coeficiente de correlación de rangos de Spearman puede dar como resultados valores desde -1.0 hasta +1.0, en donde los valores cercanos a +1.0 representan una fuerte relación entre las clasificaciones siendo directamente proporcionales, los valores cercanos a -1.0 representan una fuerte asociación negativa entre las clasificaciones siendo inversamente proporcionales. Cuando el valor es 0.0, no hay correlación (Anderson et al., 2008). Según Hernández et al. (2010) los valores de este coeficiente pueden ser interpretados como se indican en la **Tabla 5**:

Tabla 5

Grado de relación según coeficiente de correlación

Rango		Relación
De	Hasta	
-0.91	-1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76	-0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.51	-0.75	Correlación negativa considerable
-0.11	-0.50	Correlación negativa media
-0.01	-0.10	Correlación negativa débil
	0.00	No existe correlación
0.01	0.10	Correlación positiva débil
0.11	0.50	Correlación positiva media
0.51	0.75	Correlación positiva considerable
0.76	0.90	Correlación positiva muy fuerte
0.91	1.00	Correlación positiva perfecta

Nota. Tomado de Metodología de la investigación por Hernández, Fernández & Baptista, 2010, McGraw-Hill.

Biomasa

La biomasa es la cantidad total de materia viviente, que se encuentra en un área específica y sus unidades vienen dadas en gramos de carbono, o en calorías, por unidad de superficie. La medición de biomasa es la medición de cosecha, porque es el peso seco de sustancias vivientes en un momento determinado (Martínez & Leyva, 2014). Además, la biomasa puede ser útil directamente como materia orgánica en forma de abono y tratamiento de suelos (Odum, 1969). La estimación de biomasa es fundamental para entender mejor los ciclos de carbono en los ecosistemas terrestres (Houghton, 2005).

Para el cálculo de la biomasa existen varios métodos, uno de ellos es el de campo tradicional, este método es muy usado, pero sus desventajas son su alto costo, y un muestreo destructivo en la zona de estudio (Popescu, 2007). Por tal motivo surgieron otros tipos de métodos no destructivos usando las tecnologías geoespaciales, como son los sensores remotos, ya que estos pueden ser integrados con evaluaciones sobre el terreno para producir la información necesaria en la estimación de la biomasa. Sus principales ventajas es la velocidad con la que se obtienen los datos, y la capacidad de tener información en áreas de difícil acceso, además de contar con costos relativamente bajos (Bortolot & Wynne, 2005).

Para poder estimar la biomasa se realizaron vuelos con un UAV para obtener imágenes de la zona de estudio, con estas imágenes se generó un Modelo Digital de Superficie de Cultivo (MDC) y un Modelo Digital de Elevación (MDE) para calcular el volumen entre los dos modelos, valor que al multiplicarse con el factor de densidad dará como resultado la estimación de la biomasa. Para el cálculo del factor de densidad se utilizará la ecuación (18), este factor sirve para transformar los valores de volumen de m^3/m^2 a unidades de kg/m^2 (Marcos-Robles et al., 2016; Gil-Docampo et. al., 2019).

$$Fd = \frac{m}{V} \quad (20)$$

Donde:

Fd : factor de densidad (kg/m^3)

m : masa por unidad experimental (kg)

V : Volumen por unidad experimental (m^3)

Con el factor de densidad y el volumen total de la parcela se puede calcular la biomasa por tratamiento, como se muestra en la ecuación (19), expresado en unidades (kg/m^2).

$$B = Fd * V \quad (21)$$

Donde:

B : biomasa por unidad de superficie (kg/m^2)

Fd : factor de densidad (kg/m^3)

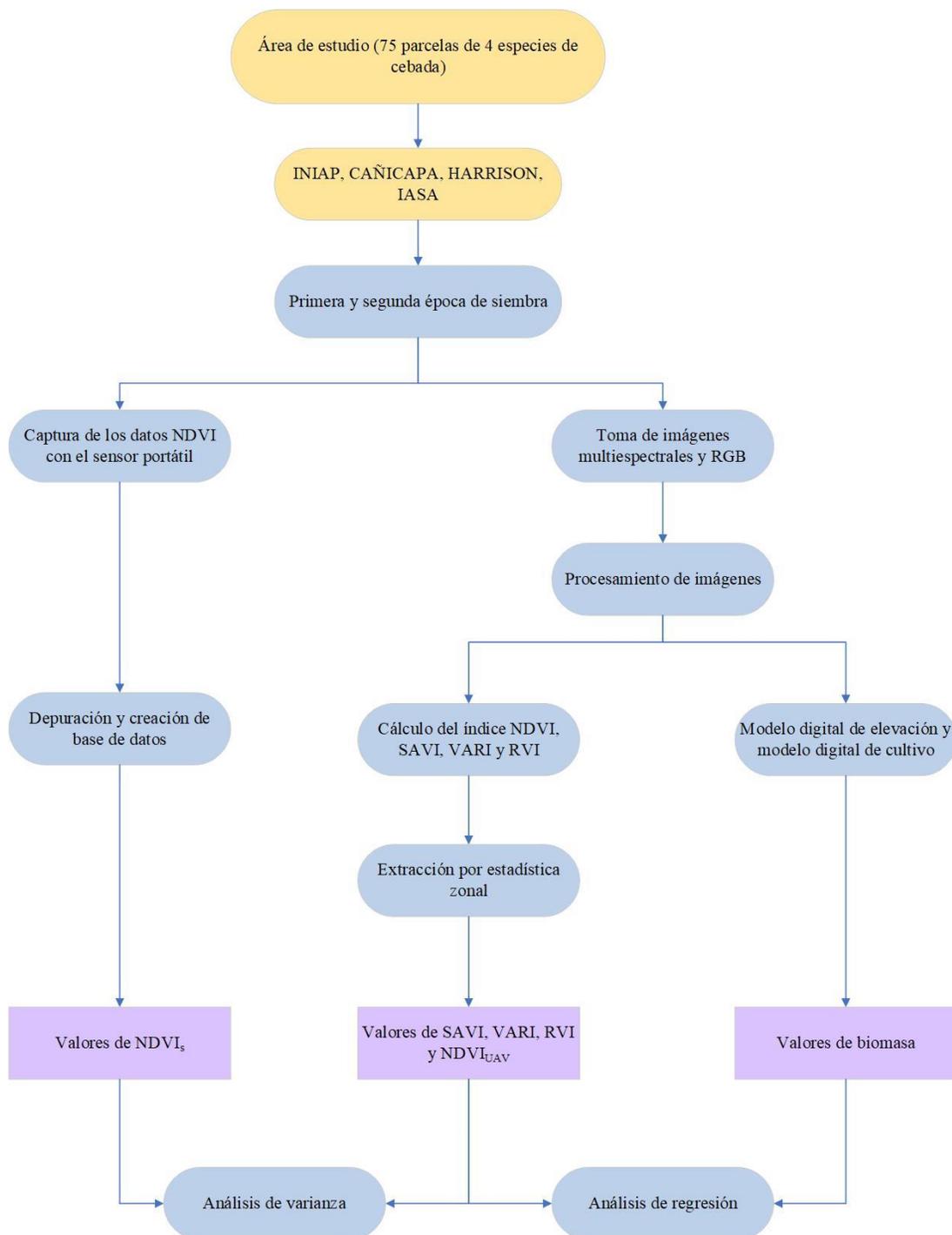
V : Volumen por unidad de superficie (m^3)

Capítulo 3 Metodología

La metodología utilizada en este proyecto se detalla en la **Figura 5**.

Figura 5

Metodología



Materiales y equipos

Los equipos utilizados en la investigación se detallan a continuación:

- Para el levantamiento de información multiespectral desde UAV se utilizó la cámara MAPIR 3W RGNIR (Red, Green, NIR) de 12 MP montada en el Drone DJI Mavic Pro con sensor CMOS con cámara de 12 MP, con el apoyo de la aplicación móvil Pix4Dcapture.
- Para la captura de datos NDVI con sensor activo, se utilizó un sensor de cultivos de mano Trimble GreenSeeker.
- Para el procesamiento de la información se utilizaron los siguientes softwares: ArcGis 10.5, Pix4D Mapper Pro, Mapir Camera Control e InfoStat.
- Para la calibración de la cámara infrarroja se utilizó una tarjeta MAPIR.
- Para la estimación de biomasa se utilizó un aro de metal, estufa, recipientes de aluminio y balanza analítica.

Diseño experimental

Para el diseño muestral, se utilizó un diseño completamente aleatorio (DCA). Este tipo de diseño, principalmente se utiliza para comparar dos o más tratamientos y solo se consideran dos fuentes de variabilidad, los tratamientos y el error aleatorio. Se llama completamente al azar porque todas las corridas experimentales se realizan en orden aleatorio completo (Gutiérrez & De la Vara, 2012).

La distribución de las parcelas dentro del área de estudio (**Figura 6**) consiste en 3 zonas, 4 repeticiones, 4 variedades de semillas, cada una con y sin fertilizantes, se utilizó una dosis de $N_{50}K_{80}P_{70}$ Kg*ha⁻¹ una semana previa a la siembra, considerando las recomendaciones de Basantes (2015), dando en total 8 tratamientos (**Tabla 6**) y 75 parcelas, ya definidas antes de la siembra.

Figura 6

Distribución de las parcelas dentro del área de estudio

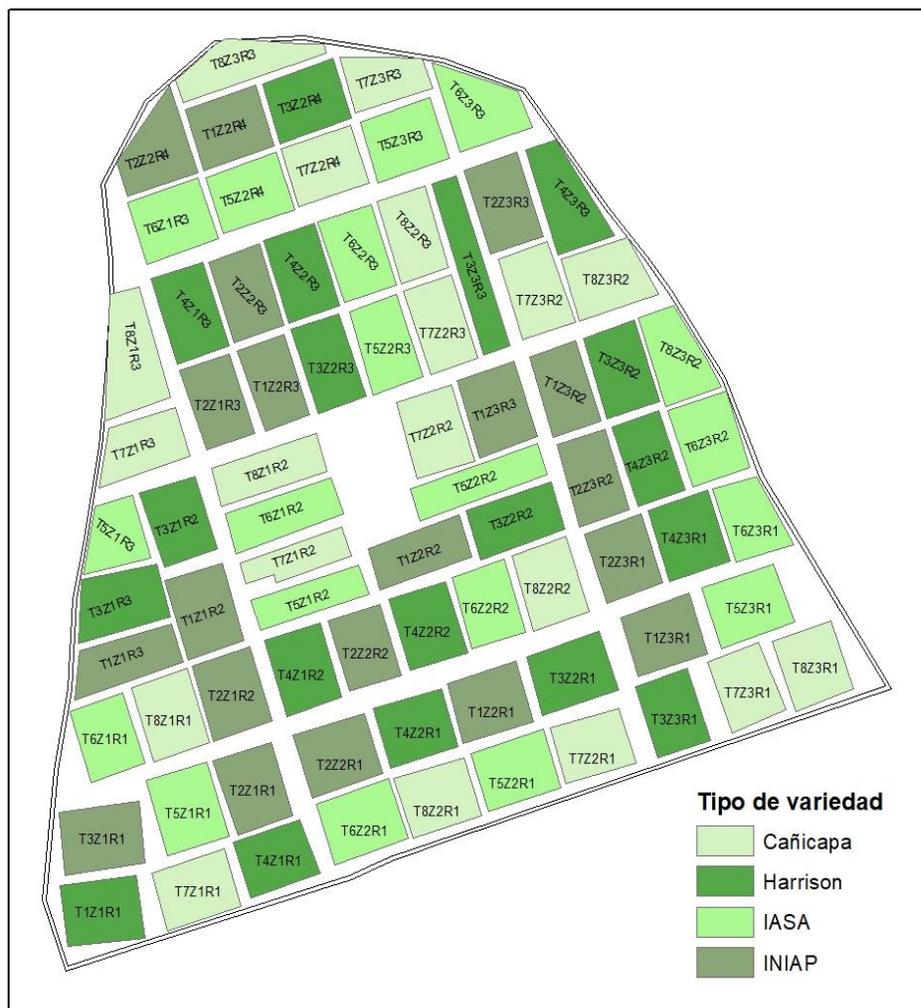


Tabla 6

Diseño experimental

Semillas	Fertilizante	Tratamiento
INIAP	Si	T1
	No	T2
HARRISON	Si	T3
	No	T4

Semillas	Fertilizante	Tratamiento
IASA	Si	T5
	No	T6
CAÑICAPA	Si	T7
	No	T8

Captura de los valores de índice de vegetación para la primera y segunda época de siembra con sensor activo

Para la captura de los valores de NDVI en el campo, se utilizó el sensor de cultivos GreenSeeker de Trimble, se tomaron datos a lo largo de 10 surcos dentro de cada parcela, se midió el valor de NDVI a una altura mínima de 60 cm, altura que garantiza una longitud de medición en el suelo de 25 cm. Se generó un total de 10 puntos muestreados a lo largo de cada surco, en cada punto muestreado, se obtuvieron 5 datos, con la intención de obtener un valor medio y reducir el error. Este proceso fue realizado en las 4 etapas fenológicas, de las 2 épocas de siembra, las fechas de los muestreos realizados se detallan en la **Tabla 7**:

Tabla 7

Cronograma para la captura de datos

Número de Muestreo	Etapas fenológicas	Época 1	Época 2
1	Germinación	28/ 01/2019	16/08/2019
2	Desarrollo y maco-llamamiento	14/03/2019	09/10/2019
3	Formación de espiga y llenado de grano	04/04/2019	02/11/2019
4	Madurez	16/05/2019	12/12/2019

Nota. La fecha de siembra de la primera época fue el 18 de enero del 2019 y para la segunda época fue el 6 de agosto del 2019.

Procesamiento de datos

Para el procesamiento de los datos obtenidos en campo, se generó un archivo .xsl (**Anexo 1**) con 75 columnas, cada una representando una parcela. De cada columna, se realizaron diagramas de caja con el objetivo de determinar los valores atípicos utilizando el software InfoStat. Una vez que se determinaron los valores atípicos

se generó un nuevo archivo .xsl para variedades y estados fenológicos que se utilizaron para el posterior análisis.

Análisis de los datos

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software InfoStat, en este se realizó un análisis de varianza (ANOVA) o una prueba Kruskal-Wallis, para conocer si existe diferencia significativa entre variedades y estados fenológicos. Adicionalmente se utilizó la prueba de Fisher LSD al 5%, para comparar si existen diferencias entre las variables de cada análisis.

Generación de índices de vegetación para la primera y segunda época de siembra a partir de las imágenes multiespectrales UAV.

Plan de vuelo

El plan de vuelo, replicado de la misma forma para todas las tomas de datos, fue realizado en la aplicación PIX4D Capture, que permite delimitar la zona y los parámetros de vuelo (**Tabla 8**). Los vuelos fueron realizados con un UAV de marca DJI Mavic PRO, acoplado a una cámara multiespectral Survey 3W RGNIR (**Figura 7**) que cuenta con bandas RGN (Red + Green + NIR).

Figura 7

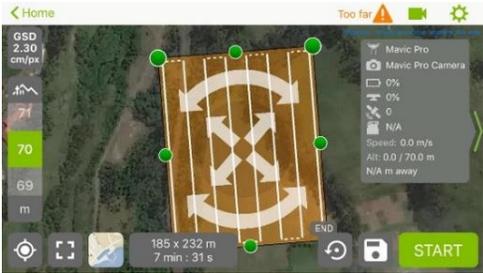
Cámara multiespectral Survey 3W RGNIR



Nota. Adaptado de MAPIR Camera [Imagen], por MAPIR, 2021, (<https://www.mapir.camera/collections/survey3/products/survey3w-camera-red-green-nir-rgn-ndvi>).

Tabla 8

Especificaciones del plan de vuelo para el drone DJI Mavic PRO

PLAN DE VUELO DJI Mavic PRO		
Indicador	Cantidad	Gráfico del vuelo
Área	185m x 232 m	
Velocidad	8 m/s	
Tiempo de vuelo	7 min 31 seg	
Altura de vuelo	70 m	
Traslado Longitudinal	80 %	
Traslado Lateral	70 %	
N° de líneas de vuelo	8	
N° de fotografías aéreas	84	
GSD	2.3 cm/px	

El vuelo antes de la siembra se realizó el 11 de enero del 2019, la planificación de los vuelos que se realizaron en las dos épocas de siembra se detallan en la **Tabla 9**:

Tabla 9

Cronograma para la captura de imágenes

Número de Muestreo	Etapas fenológicas	Época 1	Época 2
1	Germinación	28/ 01/2019	16/08/2019
2	Desarrollo y maco-llamamiento	14/03/2019	09/10/2019
3	Formación de espiga y llenado de grano	04/04/2019	02/11/2019
4	Madurez	16/05/2019	12/12/2019

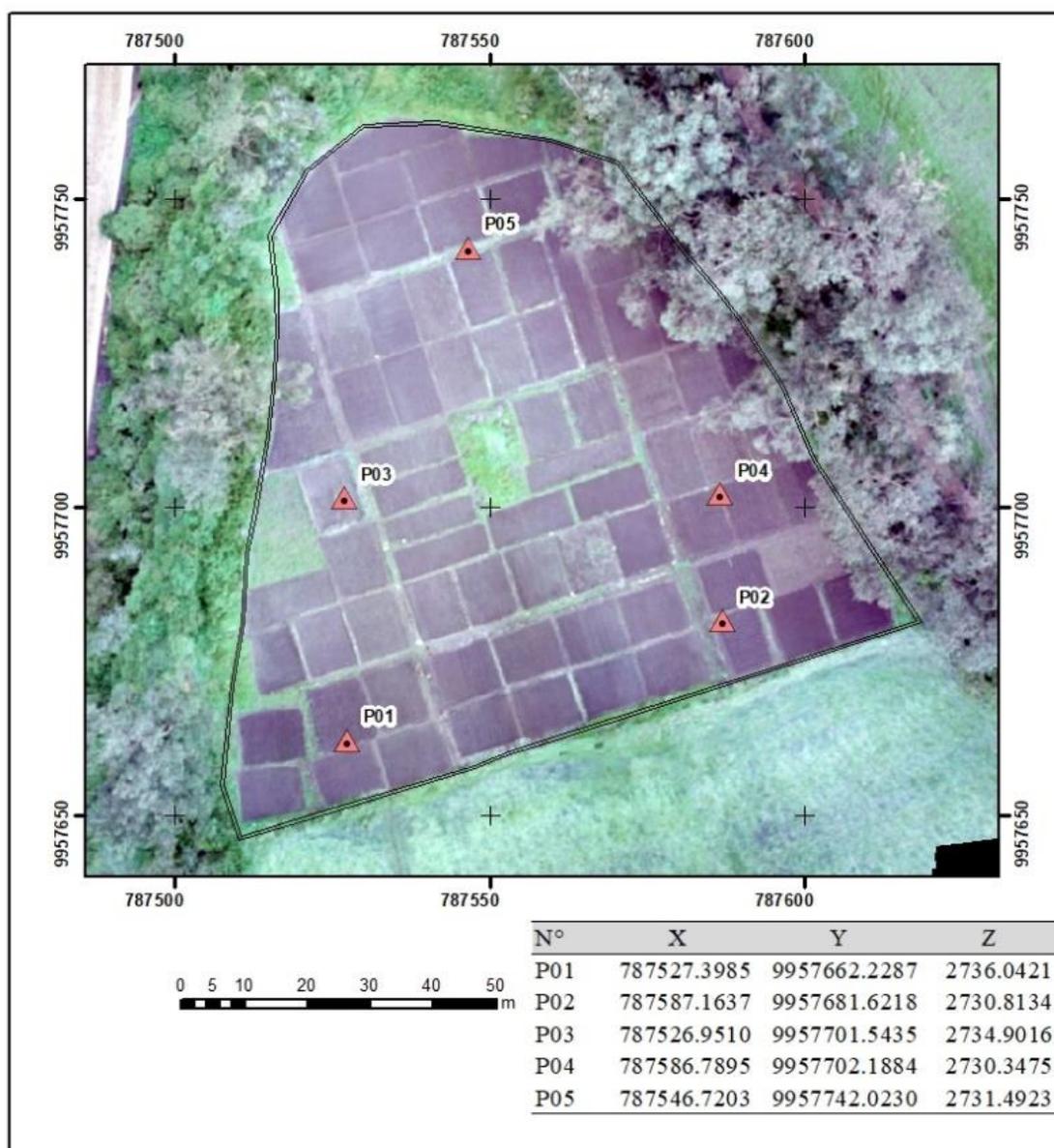
Nota. La fecha de siembra de la primera época fue el 18 de enero del 2019 y para la segunda época fue el 6 de agosto del 2019.

Puntos de apoyo fotogramétrico

Los puntos de control fueron seleccionados según los lineamientos de (Cisneros et al., 2019), estableciendo cinco puntos de control distribuidos uniformemente dentro del área de estudio. Estos puntos fueron utilizados para georreferenciar el ortomosaico de cada vuelo. En la **Figura 8** se detallan las coordenadas de los puntos de control.

Figura 8

Distribución de los puntos de control



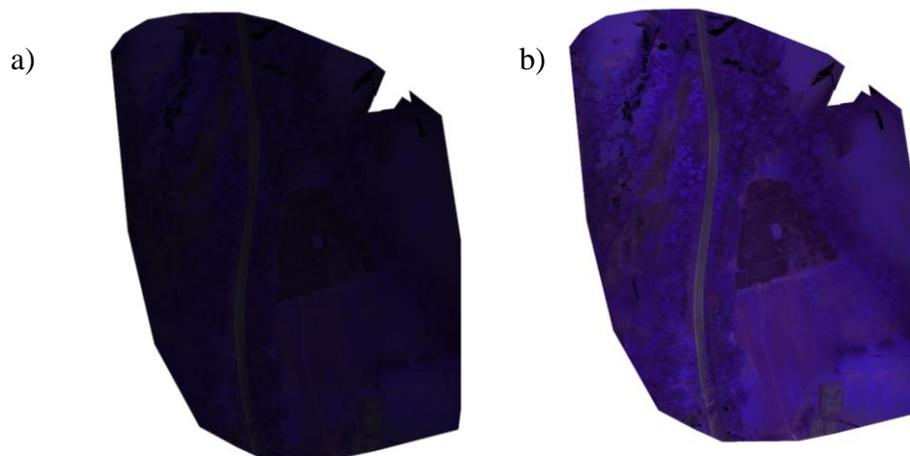
Generación de ortomosaicos RGB Y RGNIR

Una vez descargadas las imágenes del drone, se depuraron las imágenes duplicadas que no eran necesarias para la generación de los ortomosaicos, estas fueron ingresadas al software Pix4D Mapper Pro para el procesamiento de las mismas.

En el paso inicial se calibra la cámara digital y se orientan las imágenes mediante la información de cada píxel de las mismas. Una vez terminada la calibración se procede a subir los puntos de apoyo fotogramétricos expuestos en la **Figura 8**, con la ayuda de esos puntos se procede a pinchar en cada imagen que aparezca la diana correspondiente. Luego de esto se generará una nube de puntos de densidad alta, que será el paso previo para obtener los modelos digitales de superficie y ortomosaico (**Anexo 2**).

Calibración de ortomosaicos RGNIR

Para la calibración del ortomosaico infrarrojo, se empleó el software Mapir Camera Control que permite obtener un valor de reflectividad absoluto en cada píxel. Para este proceso fueron necesarias las imágenes de la tarjeta de calibración o código QR de calibración, que se obtuvieron en campo bajo las condiciones de iluminación de cada toma de datos, Esta tarjeta contiene 4 objetivos que se han medido mediante un espectrómetro de laboratorio calibrado y proporcionan valores de reflectividad conocidos. Los valores de los píxeles de las diferentes imágenes, en este caso del ortomosaico, se comparan con los valores de reflectividad del código QR, calibrando así las imágenes de cada vuelo (MAPIR, 2021). En la **Figura 9** se visualiza el ortomosaico antes y después de la calibración (**Anexo 3**).

Figura 9*Ortomosaicos*

Nota: a) Ortomosaico sin calibración, b) Ortomosaico calibrado

Generación de los índices de vegetación

Para poder obtener el promedio de los índices de vegetación de cada parcela se utilizó el software ArcGis 10.5, primero se digitalizó polígonos en cada una de las parcelas sin tomar en cuenta las zonas de suelo desnudo, dando como resultado un archivo .shp de cada estado fenológico de las dos épocas de siembra. Luego se realizó un álgebra de mapas utilizando los ortomosaicos calibrados, mediante la herramienta Raster Calculator para calcular los índices de vegetación mencionados en la **Tabla 3** obteniendo un archivo .tif, que junto con el archivo .shp fue utilizado en la herramienta Extract by Mask, donde se obtuvo los valores de los índices de vegetación en los polígonos digitalizados y por último se utilizó la herramienta Zonal Statistics para obtener el valor promedio de cada índice de vegetación por parcela, estos se exportaron a un archivo .xsl para realizar el análisis de varianza de las variedades y estados fenológicos (**Anexo 4**).

Biomasa

Generación del MDE y MDC

Para obtener el Modelo Digital de Elevación (MDE) se realizó un vuelo en el mes de julio del 2019 antes de la siembra del cultivo en la segunda época, con eso se obtuvo un archivo .las, que fue clasificado en el programa Global Mapper para generar el MDE, y para el Modelo Digital del Cultivo (MDC) se ocuparon los modelos obtenidos del procesamiento en PIX4D Mapper Pro de los meses de mayo y noviembre del 2019.

Volumen de la unidad experimental

El volumen de cada parcela se calculó en el software Global Mapper, utilizando como insumos el Modelo Digital de Elevación y el Modelo Digital del Cultivo por parcela, restando estos dos se obtuvo el volumen en m^3 .

Cálculo del Factor de Densidad (FD) para cada parcela

Se realizó un muestreo en campo dónde se sesgó una parte de la parcela utilizando un aro de diámetro de $0.25 m^2$, estas muestras se llevaron al laboratorio para poder obtener su peso en húmedo y luego se secaron en una estufa por 24 horas para obtener su peso en seco. Por otro lado, se obtuvo la altura del cultivo en ese punto de la resta del MDE y MDC, con estos valores se aplicó la ecuación $Fd = m * V$, para obtener el factor de densidad de cada parcela.

Estimación de biomasa por parcela

Para obtener el valor de biomasa se utilizó el volumen de la unidad experimental de cada parcela, y su factor de densidad, aplicando la ecuación $B = Fd * V$, el resultado se expresará en unidades de peso (kg). Si se divide para la superficie de cada parcela, el resultado puede ser expresado por unidad de superficie (kg/m^2).

Análisis estadístico

Análisis de varianza (ANOVA)

Se decidió realizar dos análisis de varianza planteando una prueba de hipótesis para conocer si existe diferencia entre variedades y entre estados fenológicos, de los valores de los índices de vegetación, comprobando previamente si los datos siguen una

distribución normal y si tienen homocedasticidad, obtenidos con el sensor activo y de los valores calculados a partir de las imágenes UAV.

- Análisis por variedades

H₀: No existe diferencia estadística en el crecimiento de la planta respecto a la variedad sembrada y la fertilización.

H₁: Si existe diferencia estadística en el crecimiento de la planta respecto a la variedad sembrada y la fertilización.

- Análisis por estados fenológicos

H₀: No existe diferencia estadística entre los estados fenológicos de la planta.

H₁: Si existe diferencia estadística entre los estados fenológicos de la planta.

Adicionalmente se utilizó la prueba de Fisher LSD al 5% de confianza, para detectar si existen clases diferenciables entre las variables de cada análisis, de los 4 índices de vegetación (NDVI, SAVI, VARI y RVI).

Prueba Kruskal-Wallis

Para los datos que no cumplieron con tener distribución normal, ni tuvieron homocedasticidad, se realizaron dos análisis de varianza al 5% de confianza, planteando una prueba de hipótesis para conocer si existe diferencia entre variedades y entre estados fenológicos, de los valores de los índices de vegetación, obtenidos con el sensor activo y de los valores calculados a partir de las imágenes UAV.

- Análisis por variedades

H₀: No existe diferencia estadística en el crecimiento de la planta respecto a la variedad sembrada y la fertilización.

H₁: Si existe diferencia estadística en el crecimiento de la planta respecto a la variedad sembrada y la fertilización.

- Análisis por estados fenológicos

H₀: No existe diferencia estadística entre los estados fenológicos de la planta.

H₁: Si existe diferencia estadística entre los estados fenológicos de la planta.

Regresión Lineal

Se comprobó que los datos no tienen una distribución normal por lo que se procedió a calcular el coeficiente de Spearman. Posteriormente se realizó el análisis de regresión lineal para modelar de manera matemática el comportamiento de la variable dependiente biomasa con las variables independientes índices de vegetación obtenidos con el sensor pasivo.

Capítulo 4

Resultados y discusión

En este estudio se obtuvieron valores a partir de 2 sensores, en el caso del sensor GreenSeeker se realizó un análisis estadístico previo, obteniendo 183 valores atípicos que fueron descartados de las dos épocas de siembra. Por otro lado, los valores obtenidos a partir de las imágenes multiespectrales se analizaron por estadística zonal para obtener un valor promedio por parcela.

Análisis estadístico del sensor de mano GreenSeeker para la primera y segunda época de siembra

Análisis de varianza de NDVI por variedades

Para poder realizar el análisis de varianza primero se comprobó que los datos sigan una distribución normal y que cumplan con la homocedasticidad, para poder aplicar ANOVA con una prueba Fisher, o la prueba de Kruskal-Wallis, estos análisis se encuentran expuestos en la **Tabla 10** para la primera época, y **Tabla 11** para la segunda época, además en la **Tabla 12** se puede visualizar los intervalos de confianza de cada análisis de varianza.

Tabla 10

Análisis del NDVI_s de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la primera época de siembra

Germinación					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.07	7	1.00E-02	0.97	0.4593
Variedad	0.07	7	1.00E-02	0.97	0.4593
Error	0.7	68	0.01		
Total	0.77	75			
Desarrollo y maco-llamamiento					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.08	7	0.01	1.87	0.0873
Variedad	0.08	7	0.01	1.87	0.0873
Error	0.43	68	0.01		
Total	0.51	75			
Formación de espiga y llenado de grano					
Variedad	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor

T1	0.71	0.05	0.73	10.67	0.1535
T2	0.7	0.04	0.7		
T3	0.67	0.1	0.64		
T4	0.65	0.05	0.64		
T5	0.68	0.05	0.68		
T6	0.67	0.06	0.68		
T7	0.7	0.05	0.68		
T8	0.64	0.07	0.64		
Madurez					
Variedad	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
T1	0.57	0.09	0.55	6.1	0.5286
T2	0.6	0.09	0.62		
T3	0.58	0.08	0.56		
T4	0.57	0.05	0.57		
T5	0.52	0.11	0.54		
T6	0.53	0.13	0.55		
T7	0.58	0.05	0.59		
T8	0.52	0.1	0.54		

Tabla 11

ANOVA del NDVI_s de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la segunda época de siembra

Germinación					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.03	7	4.10E-03	0.8	0.5933
Variedad	0.03	7	4.10E-03	0.8	0.5933
Error	0.35	68	0.01		
Total	0.38	75			
Desarrollo y maco-llamamiento					
Variedad	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
T1	0.6	0.12	0.62	12.71	0.0796
T2	0.51	0.15	0.49		
T3	0.6	0.17	0.66		
T4	0.46	0.17	0.46		
T5	0.6	0.14	0.61		
T6	0.59	0.06	0.57		
T7	0.68	0.07	0.69		
T8	0.54	0.2	0.61		
Formación de espiga y llenado de grano					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.18	7	0.03	2.7	0.016

Variedad	0.18	7	0.03	2.7	0.016
Error	0.62	67	0.01		
Total	0.8	74			
Madurez					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.13	7	0.02	3.08	0.0074
Variedad	0.13	7	0.02	3.08	0.0074
Error	0.4	64	0.01		
Total	0.53	71			

Tabla 12

Intervalos de confianza por variedades del índice NDVI_s

GERMINACIÓN					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.6333	0.7492	T1	0.3035	0.4057
T2	0.5782	0.7002	T2	0.2821	0.3619
T3	0.5072	0.7057	T3	0.2892	0.4329
T4	0.5420	0.6947	T4	0.2709	0.3394
T5	0.5776	0.7348	T5	0.2791	0.4221
T6	0.5172	0.6760	T6	0.2698	0.3567
T7	0.5736	0.7201	T7	0.2858	0.3521
T8	0.5285	0.6773	T8	0.2715	0.398
DESARROLLO Y MACO-LLAMIENTO					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.7046	0.7881	T1	0.5095	0.6864
T2	0.6676	0.7617	T2	0.4044	0.6128
T3	0.6150	0.7763	T3	0.4731	0.729
T4	0.6275	0.7371	T4	0.3306	0.5871
T5	0.6508	0.7735	T5	0.5066	0.7026
T6	0.5982	0.7259	T6	0.5444	0.6392
T7	0.6683	0.7613	T7	0.6254	0.7285
T8	0.5630	0.7042	T8	0.3857	0.6971
FORMACIÓN DE ESPIGA Y LLENADO DE GRANO					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior

T1	0.6786	0.7506	T1	0.5975	0.7584
T2	0.6709	0.7287	T2	0.5334	0.6865
T3	0.5974	0.7521	T3	0.6157	0.7464
T4	0.6066	0.6836	T4	0.5501	0.709
T5	0.6429	0.7134	T5	0.6528	0.7518
T6	0.6215	0.7148	T6	0.5486	0.6425
T7	0.6628	0.7291	T7	0.6756	0.7596
T8	0.5868	0.6929	T8	0.4676	0.6989
MADUREZ					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.5080	0.6411	T1	0.3462	0.4511
T2	0.5353	0.6667	T2	0.3473	0.4911
T3	0.5202	0.6357	T3	0.3732	0.4682
T4	0.5379	0.6107	T4	0.3534	0.4865
T5	0.4428	0.5975	T5	0.4045	0.5368
T6	0.4267	0.6313	T6	0.3355	0.4561
T7	0.5417	0.6116	T7	0.4698	0.5628
T8	0.4470	0.5950	T8	0.4001	0.5648

En la primera época de siembra para los estados de germinación, desarrollo y maco-llamamiento, se realizó el análisis de varianza ANOVA, y para los estados fenológicos restantes se realizó la prueba de Kruskal-Wallis, en donde todos los p -valor fueron mayores a 0.05, por lo tanto, se acepta la H_0 , es decir, no existe una diferencia significativa en el crecimiento de la cebada con respecto a la variedad sembrada.

En la segunda época las etapas germinación, formación de espiga y llenado de grano y madurez, se realizó el análisis de varianza ANOVA, mientras que para el segundo estado fenológico se realizó la prueba Kruskal-Wallis, se puede observar que hay una diferencia significativa en las etapas fenológicas de formación de espiga y llenado de grano y madurez, por lo que se acepta H_1 , afirmando que existe una diferencia significativa en el crecimiento de la cebada con respecto a las variedades, como se puede observar en la **Tabla 13** y **Tabla 14**.

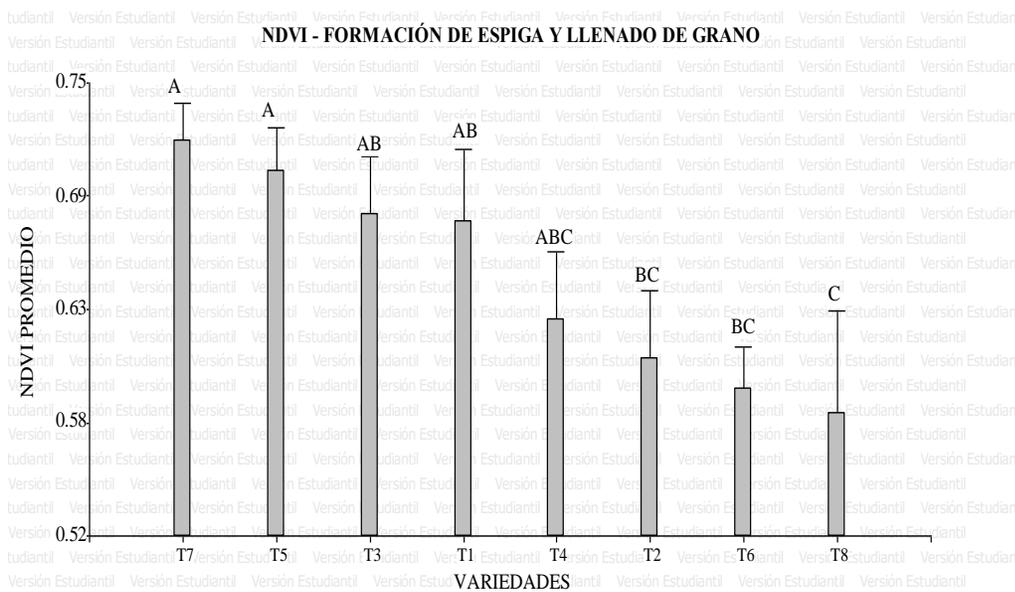
Tabla 13

Prueba LSD Fisher del índice NDVI_s de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la segunda época de siembra

Variedades	Medias	Rangos		
T7	0.72	A		
T5	0.70	A		
T3	0.68	A	B	
T1	0.68	A	B	
T4	0.63	A	B	C
T2	0.61		B	C
T6	0.60		B	C
T8	0.58			C

Figura 10

Distribución de medias para el índice NDVI_s de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la segunda época de siembra



En la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano, las variedades que se diferencian son la T7, T8 y T5, en el caso de las variedades T3, T1, T4, T2 y T6 se puede observar que comparten el mismo rango B, es decir, que estadísticamente son similares entre sí, además que la variedad T4 comparte los tres rangos A, B y C, es

decir, que esta variedad es estadísticamente similar a las demás. Se puede observar en la **Figura 10** que la media más alta para esta etapa fenológica la obtuvo el rango A con un valor de 0.72, mientras que la media más baja la obtuvo el rango C con un valor de $NDVI_S$ de 0.58.

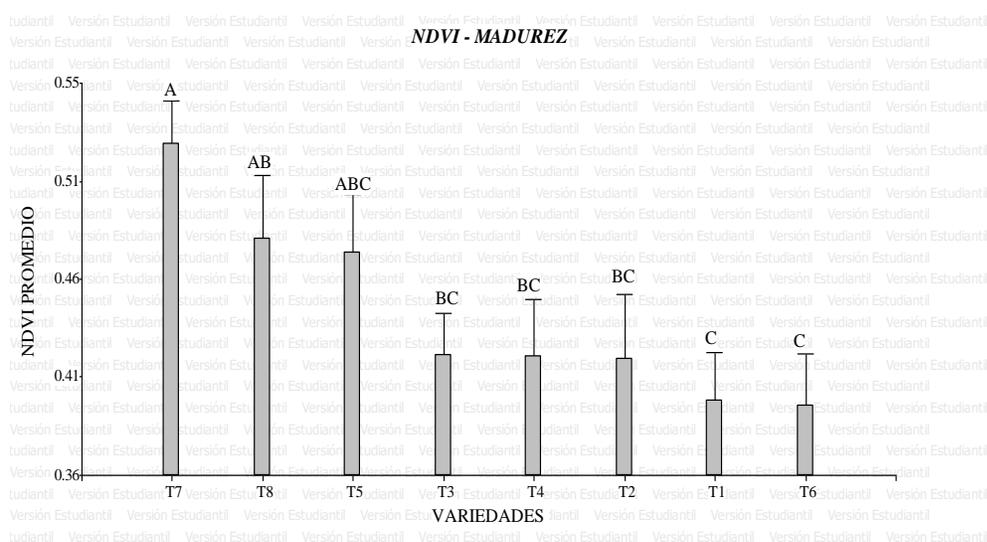
Tabla 14

Prueba LSD Fisher del índice $NDVI_S$ de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra

Variedades	Medias	Rangos		
T7	0.52	A		
T8	0.48	A	B	
T5	0.47	A	B	C
T3	0.42		B	C
T4	0.42		B	C
T2	0.42		B	C
T1	0.40			C
T6	0.40			C

Figura 11

Distribución de medias para el índice $NDVI_S$ de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra



En la última etapa fenológica se puede observar una diferencia significativa entre la T1, T6 y T7, el resto de variedades como son la T2, T4, T3, T5 y T8 comparten el mismo rango, por lo que se puede decir que estadísticamente son iguales, además que la variedad T5 es estadísticamente similar a las demás especies porque comparte el rango A, B y C. En la **Figura 11**, el mayor valor de media de NDVI_s lo ocupa el rango A con un valor de 0.52 y la media más baja en el estado fenológico de madurez la obtuvo el rango C con un valor de 0.40.

En la primera época de siembra la variedad T7 (Cañicapa con fertilización) obtuvo el valor más alto comparado con las otras variedades en la tercera etapa fenológica, teniendo un decrecimiento para el cuarto estado fenológico, esto concuerda con el desarrollo del cultivo, ya que los valores decrecen por el cambio de color de la cebada, lo que indica que esta variedad tuvo una mejor adaptación y un mejor rendimiento, tal como se mencionan en los estudios de Yar (2013) y Rivadeneira (2003), además se puede comparar que entre las variedades T7 y T8 Cañicapa con y sin fertilización respectivamente, existe una diferencia en sus resultados, por lo que se puede decir que el uso de fertilizante influye en el desarrollo del cultivo, debido a que aporta los macronutrientes necesarios (FAO, 2002).

Análisis de varianza de NDVI por estados fenológicos

Se realizó una prueba Kruskal-Wallis, saber si existe una diferencia significativa entre los estados fenológicos de cada época de siembra, los resultados se muestran en la **Tabla 15**, además se puede visualizar los intervalos de confianza de cada análisis de varianza (**Tabla 16**).

Tabla 15

Análisis del índice NDVI_s entre estados fenológicos de la primera y segunda época de siembra

Estado fenológico	Primera época				H	p-valor
	Medias	Desviación estándar	Medianas			
Germinación	0.63	0.1	0.64		80.71	<0.0001
Desarrollo y maco-llamiento	0.7	0.08	0.71			

Primera época					
Estado fenológico	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
Formación de espiga y llenado de grano	0.68	0.06	0.68		
Madurez	0.56	0.09	0.56		
Segunda época					
Estado fenológico	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
Germinación	0.33	0.07	0.33	170.5	<0.0001
Desarrollo y maco-llamamiento	0.57	0.15	0.6		
Formación de espiga y llenado de grano	0.65	0.1	0.68		
Madurez	0.44	0.09	0.44		

Tabla 16

Intervalos de confianza por estados fenológicos del índice NDVI_s

Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Estado fenológico	95% de confianza		Estado fenológico	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
Germinación	0.6104	0.6568	Germinación	0.6104	0.6567
Desarrollo y maco-llamamiento	0.6778	0.7154	Desarrollo y maco-llamamiento	0.6778	0.7153
Formación de espiga y llenado de grano	0.6638	0.6924	Formación de espiga y llenado de grano	0.6638	0.6923
Madurez	0.5390	0.5806	Madurez	0.5389	0.5806

El p -valor fue menor de 0.05 por lo tanto se rechaza la H_0 , es decir, tiene una diferencia significativa entre los estados fenológicos de la primera (**Tabla 17**) y la segunda (**Tabla 18**) época de siembra.

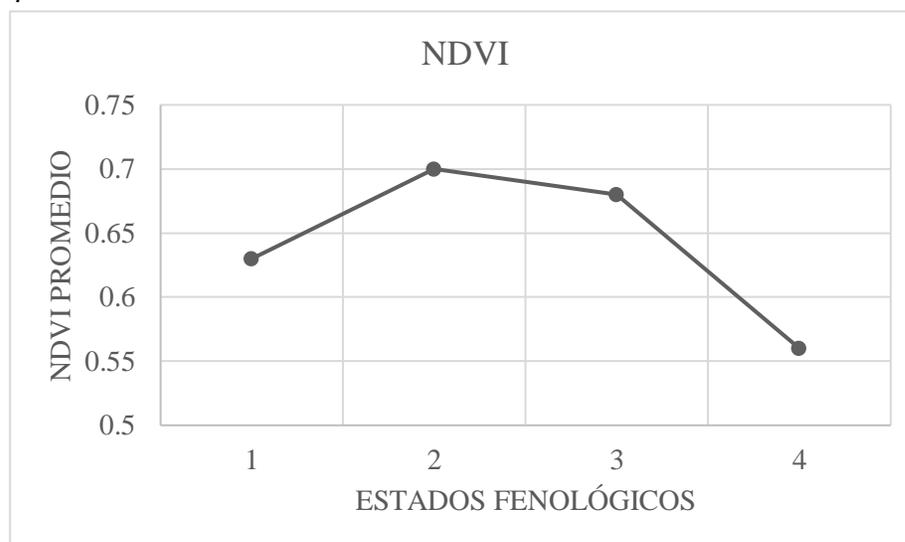
Tabla 17

Prueba Kruskal-Wallis del índice NDVI_s de los estados fenológicos de la primera época de siembra

Estados fenológicos	Medianas	Rangos
Desarrollo y macollamiento	0.70	A
Formación de espiga y llenado de grano	0.68	A
Germinación	0.63	B
Madurez	0.56	C

Figura 12

Comportamiento del índice NDVI_s a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo de la primera época de siembra



En la primera época de siembra se evidencia una diferencia significativa de los estados fenológicos madurez y germinación con respecto al desarrollo y macollamiento, y formación de espiga y llenado de grano. Se evidencia en la **Figura 12** que hay una disminución en los valores de NDVI a partir del tercer estado fenológico, esto se debe a que la cebada empieza a cambiar de color, de verde a café, por tal motivo la respuesta espectral va a ir disminuyendo. Estos resultados son similares a los que presenta Marini et al., (2019) en el estudio de evaluación del desarrollo de cereales,

dónde se evidencia que la curva de la evolución del promedio de NDVI para el cultivo de cebada de la siembra del año 2019 presenta un crecimiento en los dos primeros meses, y luego decrece en los últimos meses del cultivo.

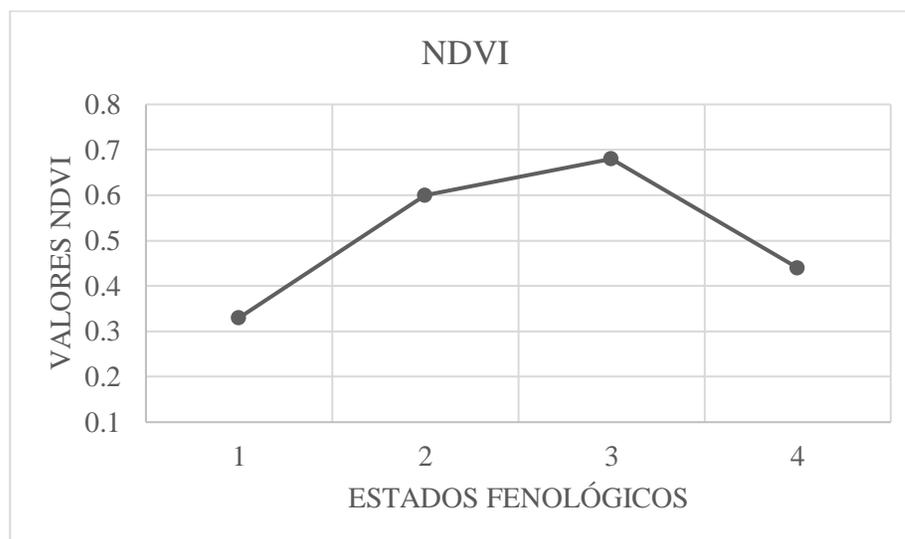
Tabla 18

Prueba Kruskal-Wallis del índice NDVI_s de los estados fenológicos de la segunda época de siembra

Estados fenológicos	Medianas	Rangos
Formación de espiga y llenado de grano	0.68	A
Desarrollo y macollamiento	0.60	B
Madurez	0.44	C
Germinación	0.33	D

Figura 13

Comportamiento del índice NDVI_s a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo de la segunda época de siembra



En la segunda época de siembra se evidencia una diferencia significativa entre los 4 estados fenológicos del cultivo de la cebada. Como se observa en la **Figura 13**

existe un incremento en el índice NDVI_S hasta el tercer estado fenológico, en cuanto al cuarto estado fenológico, madurez, se observa una disminución del valor del índice, lo que nos indica una clara diferencia entre estas dos etapas fenológicas tal como se menciona en Tello (2016) donde dice que la fase de maduración comienza cuando los valores de NDVI_S vuelven a ser los más bajos.

Análisis estadístico de los valores de índices de vegetación obtenidos a partir de las imágenes multiespectrales UAV

Se generaron 4 índices de vegetación NDVI, RVI, SAVI y VARI, a partir de los ortomosaicos NIR y RGB, a los que se les aplicó una prueba de varianza ANOVA con test de Fisher o una prueba de Kruskal-Wallis, para comprobar si hay diferencia significativa entre variedades y estados fenológicos.

Análisis de varianza de NDVI por variedades

Para poder aceptar o rechazar las hipótesis planteadas en los apartados 3.6.1 y 3.6.2, se realizó un análisis de varianza expuesto en la **Tabla 19** para la primera época, y **Tabla 20** para la segunda época, además en la **Tabla 21** se puede visualizar los intervalos de confianza de cada análisis de varianza.

Tabla 19

Análisis del NDVI_{UAV} de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la primera época de siembra

Germinación					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.0011	7	1.50E-04	0.75	0.627
Variedad	0.0011	7	1.50E-04	0.75	0.627
Error	0.01	59	0.0002		
Total	0.01	66			
Desarrollo y maco-llamamiento					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.0041	7	0.00059	0.89	0.5209
Variedad	0.0041	7	0.00059	0.89	0.5209
Error	0.04	59	0.00066		
Total	0.04	66			
Formación de espiga y llenado de grano					

Variedad	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p
T1	0.53	0.01	0.53	22.36	0.0022
T2	0.52	0.01	0.52		
T3	0.50	0.03	0.52		
T4	0.50	0.02	0.5		
T5	0.52	0.01	0.52		
T6	0.52	0.01	0.53		
T7	0.53	0.01	0.54		
T8	0.52	0.02	0.53		

Madurez					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.06	7	0.01	4.39	0.0006
Variedad	0.06	7	0.01	4.39	0.0006
Error	0.12	59	0.0021		
Total	0.19	66			

Tabla 20

Análisis del NDVI_{UAV} de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la segunda época de siembra

Germinación					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.0031	7	4.40E-04	0.76	0.6266
Variedad	0.0031	7	4.40E-04	0.76	0.6266
Error	0.03	58	0.00059		
Total	0.04	65			

Desarrollo y maco-llamiento					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.01	7	0.0008	0.35	0.9253
Variedad	0.01	7	0.0008	0.35	0.9253
Error	0.13	59	0.0023		
Total	0.14	66			

Formación de espiga y llenado de grano					
--	--	--	--	--	--

Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.002	7	0.00029	0.68	0.6878
Variedad	0.002	7	0.00029	0.68	0.6878
Error	0.02	58	0.00042		
Total	0.03	65			

Madurez					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.04	7	0.01	5.7	0.0001
Variedad	0.04	7	0.01	5.7	0.0001
Error	0.06	55	0.0011		
Total	0.10	62			

Tabla 21

Intervalos de confianza por variedades del índice NDVI_{UAV}

GERMINACIÓN					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.2522	0.2697	T1	0.2438	0.3003
T2	0.2468	0.2655	T2	0.2381	0.2627
T3	0.2371	0.2653	T3	0.2408	0.2755
T4	0.2444	0.2618	T4	0.2486	0.2742
T5	0.2494	0.2772	T5	0.2354	0.2730
T6	0.2413	0.2633	T6	0.2389	0.2737
T7	0.2470	0.2698	T7	0.2364	0.2669
T8	0.2416	0.2701	T8	0.2376	0.2830

DESARROLLO Y MACO-LLAMIENTO					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.5143	0.5447	T1	0.2772	0.3412
T2	0.5044	0.5339	T2	0.2640	0.3580
T3	0.4900	0.5337	T3	0.2925	0.3544
T4	0.4845	0.5362	T4	0.2768	0.3566
T5	0.4930	0.5494	T5	0.2846	0.3649
T6	0.4882	0.5298	T6	0.2718	0.3635
T7	0.5128	0.5441	T7	0.3130	0.3600

T8	0.4858	0.5361	T8	0.2458	0.3734
FORMACIÓN DE ESPIGA Y LLENADO DE GRANO					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.5195	0.5336	T1	0.3144	0.3407
T2	0.5152	0.5298	T2	0.3074	0.3430
T3	0.4823	0.5250	T3	0.3219	0.3452
T4	0.4788	0.5195	T4	0.3056	0.3592
T5	0.5140	0.5242	T5	0.3092	0.3513
T6	0.5038	0.5312	T6	0.3008	0.3335
T7	0.5263	0.5413	T7	0.3256	0.3416
T8	0.5072	0.5413	T8	0.2981	0.3429
MADUREZ					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.2899	0.3525	T1	0.2490	0.2930
T2	0.3034	0.3609	T2	0.2376	0.2887
T3	0.3274	0.3963	T3	0.2570	0.3065
T4	0.3234	0.3907	T4	0.2467	0.3030
T5	0.2389	0.3507	T5	0.2580	0.3416
T6	0.2600	0.3143	T6	0.2352	0.2760
T7	0.2393	0.3137	T7	0.3116	0.3499
T8	0.2448	0.3293	T8	0.2855	0.3681

En la primera época de siembra para las etapas fenológicas germinación, desarrollo y maco-llamamiento y madurez se realizó ANOVA y para la formación de espiga y llenado de grano se realizó la prueba Kruskal-Wallis, dónde se evidencia que en el primer y segundo estados fenológicos los p -valor fueron mayores a 0.05, por lo tanto, se acepta la H_0 , es decir, no existe una diferencia significativa en el crecimiento de la cebada con respecto a las especies que se sembraron, en cuanto al tercer y cuarto estado fenológico, los p -valor fueron menores a 0.05, por lo tanto se acepta el H_1 , lo que indica una diferencia significativa entre las variedades sembradas, por tal motivo se realizó una prueba Kruskal-Wallis (**Tabla 22**) y una prueba LSD Fisher (**Tabla 23**).

En la segunda época de siembra los datos cumplieron con los requisitos de homocedasticidad y normalidad, por lo que se realizó en cada estado fenológico una prueba ANOVA, en dónde se encontró una diferencia significativa solo en la última

etapa fenológica, por lo que se acepta H_1 , afirmando que existe una diferencia significativa en el crecimiento de la cebada con respecto a las variedades sembradas y se realizó una prueba LSD Fisher para distinguir las diferencias de cada variedad (Tabla 24).

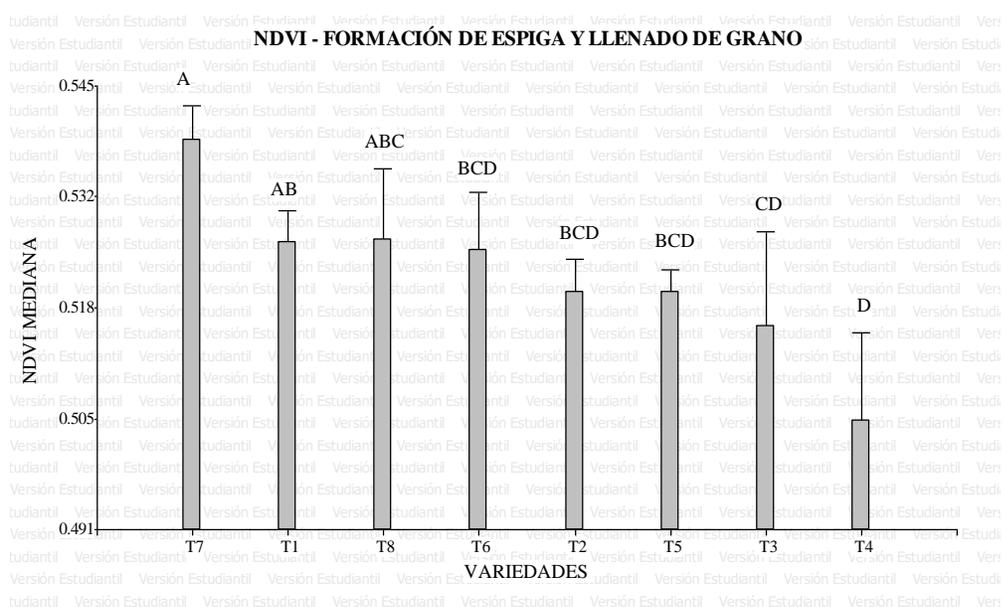
Tabla 22

Prueba Kruskal-Wallis del índice $NDVI_{UAV}$ de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra

Variedades	Medianas	Rangos			
T7	0.54	A			
T1	0.53	A	B		
T8	0.53	A	B	C	
T6	0.53		B	C	D
T2	0.52		B	C	D
T5	0.52		B	C	D
T3	0.52			C	D
T4	0.50				D

Figura 14

Distribución de medianas para el índice $NDVI_{UAV}$ de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra



En la **Tabla 22** se demuestra que las variedades T7 y T4 se diferencian del resto de variedades, además las variedades T6, T2 y T5 comparten el rango BDC, por lo que se puede decir que significativamente son iguales. En la **Figura 14** se observa que para ese estado fenológico el valor de $NDVI_{UAV}$ más alto lo tiene el rango A con un valor de 0.54, mientras que el valor promedio menor lo tiene el rango D con un valor de 0.50.

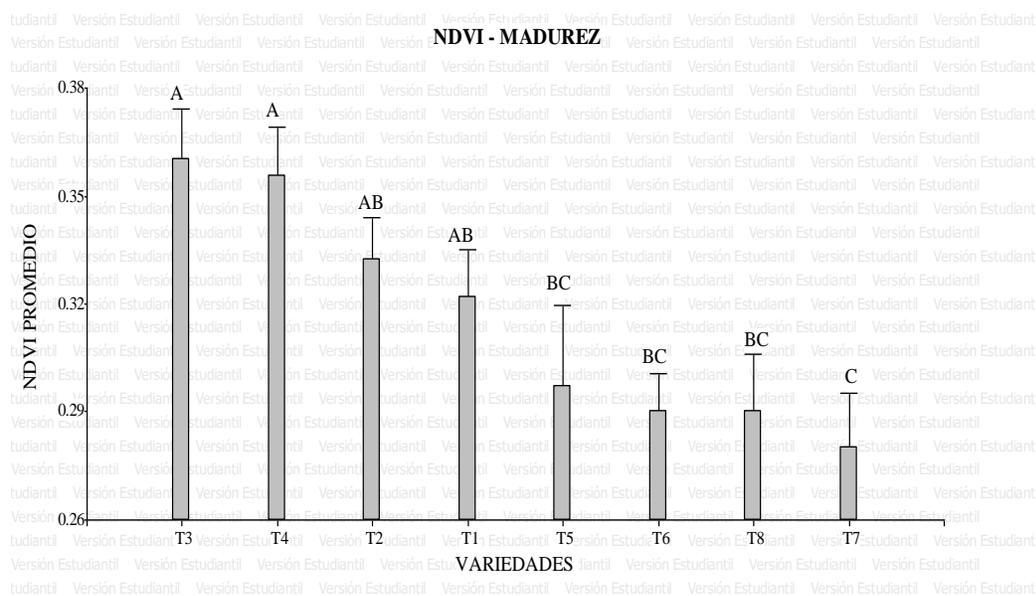
Tabla 23

Prueba LSD Fisher del índice $NDVI_{UAV}$ de las variedades en la etapa fenológica de madurez de la primera época de siembra

Variedades	Medias	Rangos	
T3	0.36	A	
T4	0.36	A	
T2	0.33	A	B
T1	0.32	A	B
T5	0.29		B C
T6	0.29		B C
T8	0.29		B C
T7	0.28		C

Figura 15

Distribución de medias para el índice $NDVI_{UAV}$ de las variedades en la etapa fenológica de madurez de la primera época de siembra



En esta etapa fenológica las variedades que se diferencian estadísticamente son la T3, T4 y T7 del resto de las variedades sembradas, como es el caso de las variedades T5, T6 Y T8 que comparten rangos B y C, y las variedades T1 y T2 que comparten el rango A y B, es decir, que estadísticamente son similares. Se puede observar que en la **Figura 15**, el valor promedio de $NDVI_{UAV}$ más alto se encuentra en el rango A con un valor de 0.36, y el valor más bajo está en el rango C con un valor de 0.28.

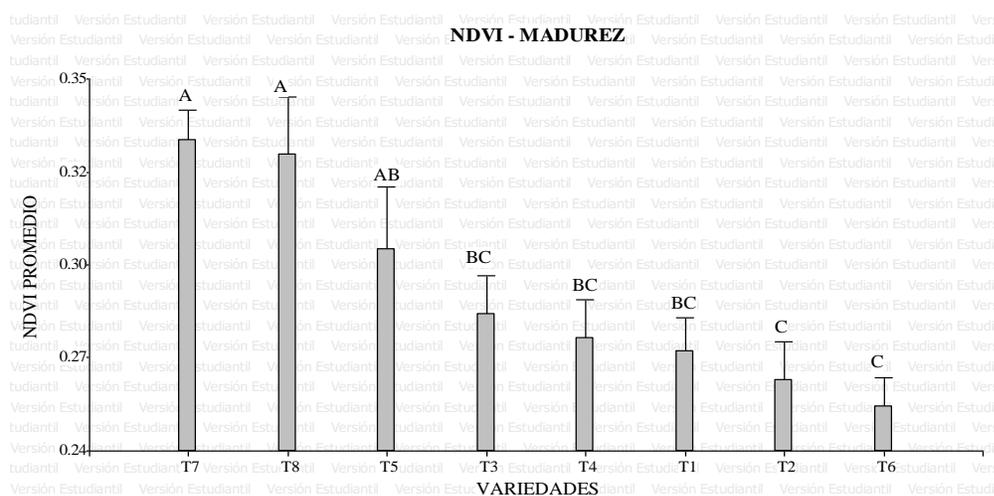
Tabla 24

Prueba LSD Fisher de índice $NDVI_{UAV}$ de las variedades en la etapa fenológica de madurez de la segunda época de siembra

Variedades	Medias	Rangos	
T7	0.33	A	
T8	0.33	A	
T5	0.30	A	B
T3	0.28		B C
T4	0.27		B C
T1	0.27		B C
T2	0.26		C
T6	0.26		C

Figura 16

Distribución de medias para el índice $NDVI_{UAV}$ de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra



En la segunda época de siembra en la etapa de madurez las variedades que se diferencian son T7, T8, T2 y T6, con respecto a las otras variedades, en el caso de las variedades T5, T3, T4 y T1 se puede decir que estadísticamente son iguales porque comparten el mismo rango de B. En la **Figura 16** se puede observar que el valor promedio más alto lo tiene el rango A con un valor de 0.33, mientras que en el rango C con un valor de 0.26 ocupa el valor promedio más bajo.

Análisis de varianza de NDVI por estados fenológicos

Se realizó una prueba Kruskal-Wallis, saber si existe una diferencia significativa entre los estados fenológicos de cada época de siembra, los resultados se muestran en la **Tabla 25**, además se puede visualizar los intervalos de confianza de cada análisis de varianza (**Tabla 26**).

Tabla 25

Análisis del índice NDVI_{UAV} entre estados fenológicos de la primera y segunda época de siembra.

Primera época					
Estado fenológico	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
Germinación	0.26	0.01	0.25	210.84	<0.0001
Desarrollo y maco-llamamiento	0.52	0.03	0.52		
Formación de espiga y llenado de grano	0.52	0.02	0.52		
Madurez	0.32	0.05	0.32		
Segunda época					
Estado fenológico	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
Germinación	0.26	0.02	0.26	109.84	<0.0001
Desarrollo y maco-llamamiento	0.32	0.05	0.31		
Formación de espiga y llenado de grano	0.33	0.02	0.33		
Madurez	0.29	0.04	0.28		

Tabla 26

Intervalos de confianza por estados fenológicos del índice NDVI_{UAV}

Estado fenológico	Primera época de siembra		Estado fenológico	Segunda época de siembra	
	95% de confianza			95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
Germinación	0.2531	0.2600	Germinación	0.2523	0.2640
Desarrollo y maco-llamamiento	0.5120	0.5245	Desarrollo y maco-llamamiento	0.3081	0.3305
Formación de espiga y llenado de grano	0.5139	0.5232	Formación de espiga y llenado de grano	0.3232	0.3331
Madurez	0.3031	0.3292	Madurez	0.2786	0.2992

El p -valor fue menor de 0.05 por lo tanto se rechaza la H_0 , es decir, tiene una diferencia significativa entre los estados fenológicos de la primera (**Tabla 27**) y la segunda época de siembra (**Tabla 28**).

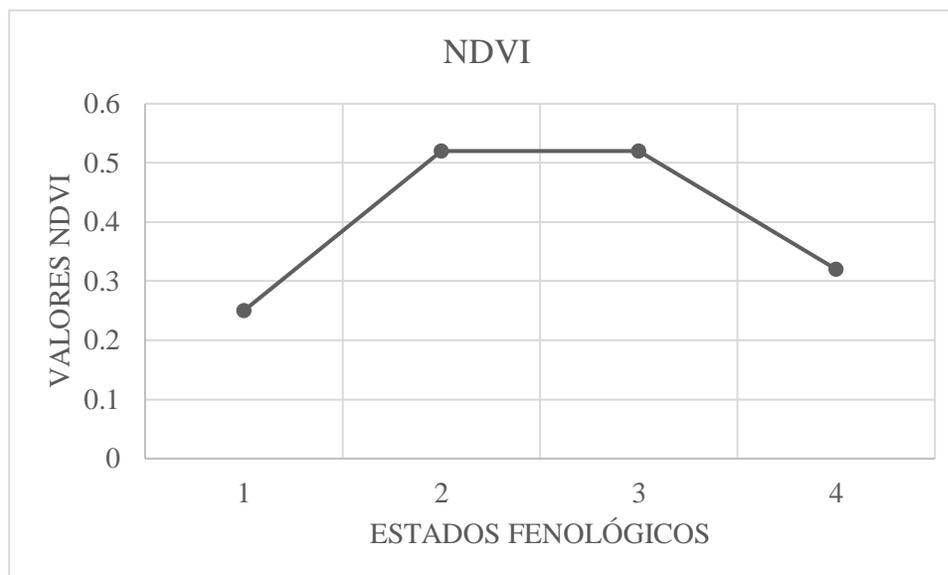
Tabla 27

Prueba Kruskal-Wallis del índice NDVI_{UAV} de los estados fenológicos de la primera época de siembra

Estados fenológicos	Medianas	Rangos
Formación de espiga y llenado de grano	0.52	A
Desarrollo y maco-llamamiento	0.52	A
Madurez	0.32	B
Germinación	0.25	C

Figura 17

Comportamiento del índice $NDVI_{UAV}$ a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo de la primera época de siembra



En la primera época de siembra se evidencia una diferencia significativa de los estados fenológicos madurez y germinación con respecto al desarrollo y macollamiento, y formación de espiga y llenado de grano. Se puede observar en la **Figura 17** que el NDVI tiene un crecimiento exponencial hasta el segundo estado fenológico, a partir de ahí los valores se mantienen hasta el tercer estado fenológico para finalmente decrecer en el cuarto estado fenológico.

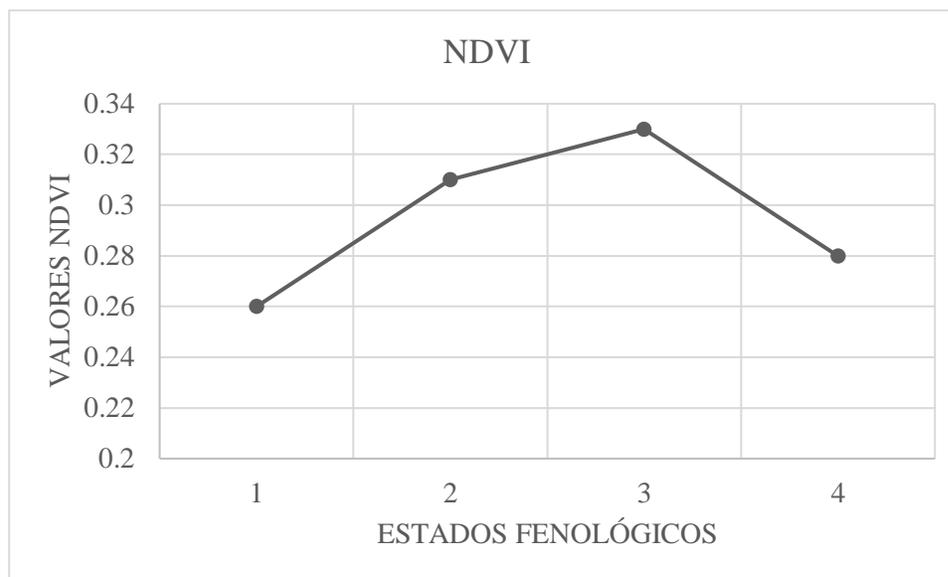
Tabla 28

Prueba Kruskal-Wallis del índice $NDVI_{UAV}$ de los estados fenológicos de la segunda época de siembra

Estados fenológicos	Medianas	Rangos
Formación de espiga y llenado de grano	0.33	A
Desarrollo y macollamiento	0.31	A
Madurez	0.28	B
Germinación	0.26	C

Figura 18

Comportamiento del índice $NDVI_{UAV}$ a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo de la segunda época de siembra



En la segunda época de siembra se evidencia una diferencia significativa de los estados fenológicos madurez y germinación con respecto al desarrollo y macollamiento, y formación de espiga y llenado de grano. En la **Figura 18** se visualiza al igual que el índice $NDVI_S$, un incremento del valor promedio hasta la etapa de formación de espiga y llenado de grano, teniendo una disminución en la última etapa fenológica del cultivo.

Análisis de varianza de RVI por variedades.

Para poder aceptar o rechazar las hipótesis planteadas en los apartados 3.6.1 y 3.6.2, se realizó un análisis de varianza expuesto en la **Tabla 29** para la primera época, y **Tabla 30** para la segunda época, además en la **Tabla 31** se puede visualizar los intervalos de confianza de cada análisis de varianza.

Tabla 29

Análisis del RVI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la primera época de siembra

Germinación					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.01	7	2.00E-03	0.76	0.6247
Variedad	0.01	7	2.00E-03	0.76	0.6247
Error	0.16	59	2.70E-03		
Total	0.17	66			
Desarrollo y maco-llamiento					
Variedad	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
T1	3.27	0.17	3.31	8.47	0.2927
T2	3.18	0.16	3.14		
T3	3.12	0.23	3.14		
T4	3.11	0.24	3.17		
T5	3.21	0.26	3.31		
T6	3.1	0.18	3.17		
T7	3.26	0.17	3.33		
T8	3.12	0.22	3.19		
Formación de espiga y llenado de grano					
Variedad	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
T1	3.23	0.09	3.22	21.25	0.0034
T2	3.2	0.08	3.17		
T3	3.05	0.22	3.13		
T4	3.01	0.19	3.04		
T5	3.18	0.06	3.18		
T6	3.16	0.13	3.22		
T7	3.3	0.09	3.34		
T8	3.22	0.16	3.23		
Madurez					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	1.2	7	0.17	4.05	0.0011
Variedad	1.2	7	0.17	4.05	0.0011
Error	2.5	59	0.04		
Total	3.7	66			

Tabla 30

Análisis del RVI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la segunda época de siembra

Germinación					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.05	7	1.00E-02	0.84	0.5615
Variedad	0.05	7	1.00E-02	0.84	0.5615
Error	0.52	59	1.00E-02		
Total	0.57	66			
Desarrollo y maco-llamiento					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.1	7	0.01	0.31	0.9487
Variedad	0.1	7	0.01	0.31	0.9487
Error	2.69	59	0.05		
Total	2.79	66			
Formación de espiga y llenado de grano					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.04	7	1.00E-02	0.66	0.7078
Variedad	0.04	7	1.00E-02	0.66	0.7078
Error	0.49	58	1.00E-02		
Total	0.53	65			
Madurez					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.78	7	0.11	5.35	0.0001
Variedad	0.78	7	0.11	5.35	0.0001
Error	1.15	55	0.02		
Total	1.93	62			

Tabla 31

Intervalos de confianza por variedades del índice RVI

GERMINACIÓN					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	1.6749	1.7403	T1	1.6425	1.8797
T2	1.6561	1.7237	T2	1.6273	1.7158
T3	1.6223	1.7237	T3	1.6372	1.7657
T4	1.6473	1.7102	T4	1.6634	1.7608
T5	1.6659	1.7669	T5	1.6184	1.7565
T6	1.6368	1.7155	T6	1.6282	1.7591
T7	1.6573	1.7395	T7	1.6219	1.7323
T8	1.6381	1.7403	T8	1.6258	1.7934

DESARROLLO Y MACO-LLAMIENTO					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	3.1482	3.395	T1	1.7752	2.0434
T2	3.0614	3.3029	T2	1.7199	2.1313
T3	2.9467	3.3003	T3	1.8375	2.1029
T4	2.9101	3.3158	T4	1.7516	2.1434
T5	2.992	3.4279	T5	1.8012	2.1671
T6	2.9323	3.2699	T6	1.7473	2.1552
T7	3.1333	3.3918	T7	1.9185	2.1375
T8	2.9234	3.3218	T8	1.6341	2.2094

FORMACIÓN DE ESPIGA Y LLENADO DE GRANO					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	3.169	3.2931	T1	1.9165	2.0394
T2	3.1306	3.2606	T2	1.8885	2.0482
T3	2.883	3.2146	T3	1.951	2.0582
T4	2.8532	3.1648	T4	1.8804	2.1264
T5	3.1282	3.2251	T5	1.8988	2.0857
T6	3.0385	3.2721	T6	1.8644	2.0012
T7	3.2284	3.3652	T7	1.9676	2.04
T8	3.0721	3.3607	T8	1.8529	2.0437

MADUREZ					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	1.835	2.1094	T1	1.664	1.8415
T2	1.8862	2.151	T2	1.6232	1.8223
T3	1.9915	2.3293	T3	1.6946	1.8956
T4	1.9691	2.3149	T4	1.652	1.8789
T5	1.6316	2.1244	T5	1.6871	2.0727
T6	1.7156	1.9404	T6	1.6154	1.7682
T7	1.6367	1.9456	T7	1.9103	2.0936
T8	1.6561	2.0133	T8	1.8879	2.1168

En la primera época de siembra, el desarrollo y maco-llamamiento y formación de espiga y llenado de grano se realizó la prueba de Kruskal-Wallis, mientras que la germinación y madurez se realizó una prueba ANOVA, el p -valor fue menor de 0.05 en la formación de espiga y llenado de grano, y madurez, por lo tanto, se rechaza la H_0 , es decir, tiene una diferencia significativa. Para el tercer estado fenológico se realizó una prueba Kruskal-Wallis para determinar las variedades que fueron diferentes (**Tabla 32**) y para el cuarto estado fenológico se realizó una prueba LSD Fisher (**Tabla 33**).

En la segunda época de siembra, en todas las etapas fenológicas se realizó una prueba ANOVA y solo en el estado de madurez el p -valor fue menor a 0.05 por lo que tiene una diferencia significativa, la que se determinó usando una prueba LSD Fisher (**Tabla 34**).

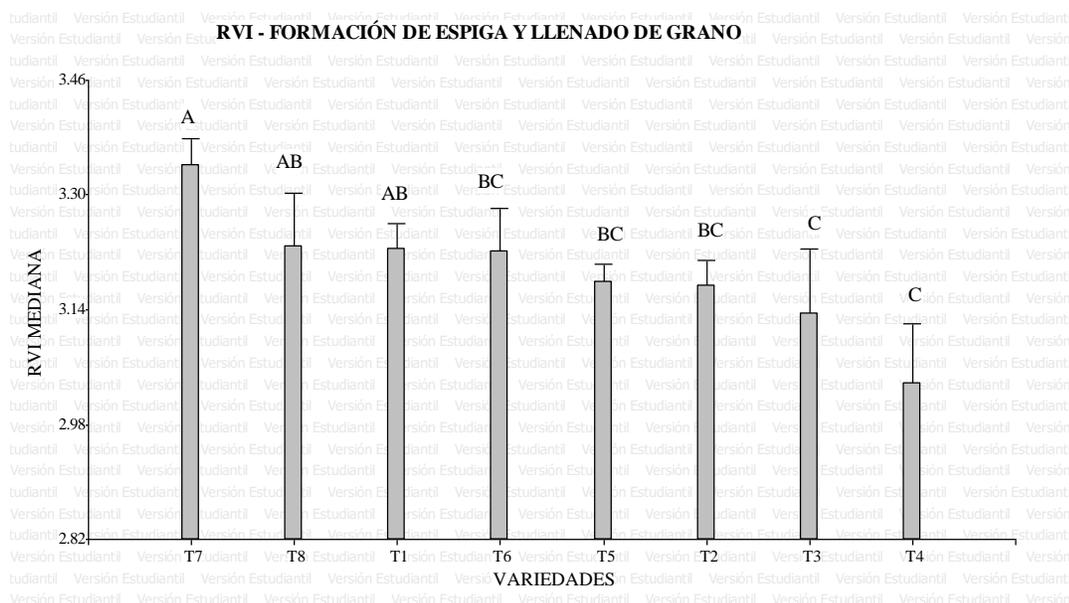
Tabla 32

Prueba Kruskal-Wallis del índice RVI de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra

Variedades	Medianas	Rango	
T7	3.34	A	
T8	3.23	A	B
T1	3.22	A	B
T6	3.22		B C
T5	3.18		B C
T2	3.17		B C
T3	3.13		C
T4	3.04		C

Figura 19

Distribución de medianas para el índice RVI de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra



Se demuestra que la variedad T3, T4 y T7 en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano tuvo una diferencia significativa con respecto a las otras variedades sembradas, en el caso de las variedades T6, T5, T2, T8 y T1 que comparten el rango B, se puede decir que son estadísticamente similares. Se puede observar en la **Figura 19** que el rango A es el que posee la media más alta con valor un 3.30 de este índice de vegetación, mientras que el rango con el valor promedio más bajo lo tiene el rango C con un valor de 3.01.

Tabla 33

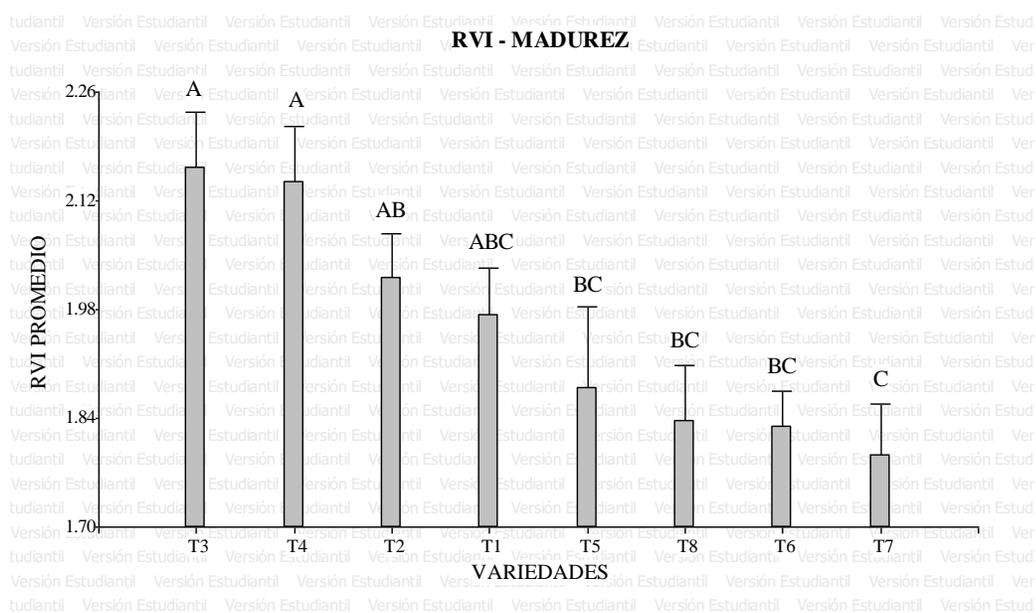
Prueba LSD Fisher del índice RVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la primera época de siembra

Variedades	Medias	Rango
T3	2.16	A
T4	2.14	A
T2	2.02	A
		B

Variedades	Medias	Rango
T1	1.97	A
T5	1.88	B
T8	1.83	B
T6	1.83	B
T7	1.79	C

Figura 20

Distribución de medias para el índice RVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la primera época de siembra



Se demuestra que la variedad T3, T4 y T7 tuvo una diferencia significativa con respecto a las otras variedades sembradas, además que las variedades T6, T8, T5, T1 y T2, comparten el mismo rango B, por lo que se puede decir que estadísticamente son similares. Como se puede observar en la **Figura 20** para esta etapa fenológica el valor promedio más alto de RVI lo tiene el rango A con un valor de 2.16 y la media más baja lo tiene el rango C con un valor de 1.79.

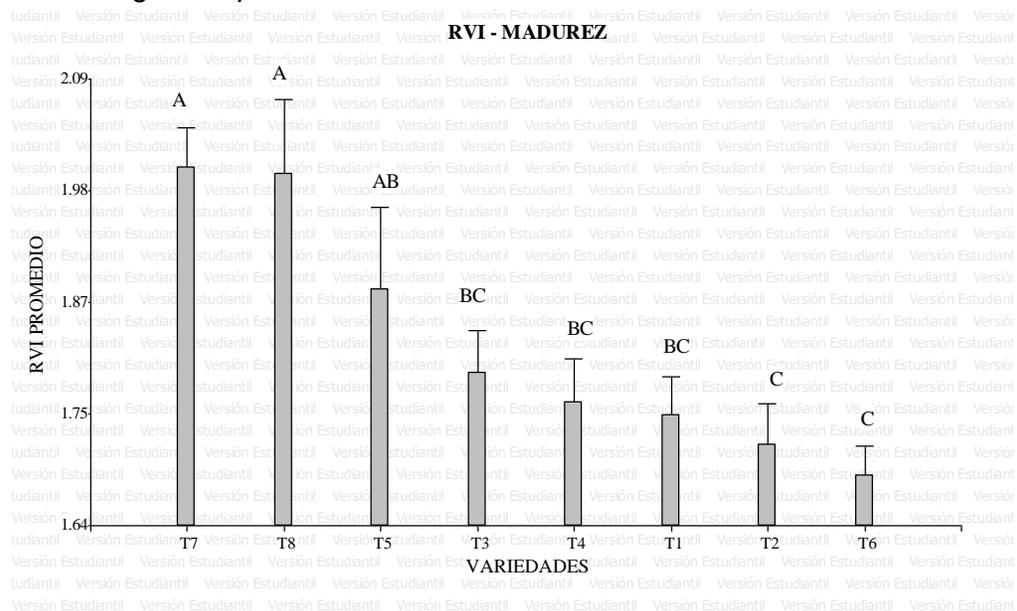
Tabla 34

Prueba LSD Fisher del índice RVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra

Variedades	Medias	Rango		
T7	2.00	A		
T8	2.00	A		
T5	1.88	A	B	
T3	1.80		B	C
T4	1.77		B	C
T1	1.75		B	C
T2	1.72			C
T6	1.69			C

Figura 21

Distribución de medias para el índice RVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra



Se puede observar en la **Tabla 34** que las variedades T6, T2, T8 y T7 tienen diferencias significativas con las demás variables, las variedades T1, T4, T3 y T5 comparten el mismo rango por lo que son significativamente iguales. Como se puede observar en la **Figura 21**, las variedades que tienen rango A son los que poseen la

media más alta de RVI con un valor de 2.00 y las variedades que tienen rango C son los que tienen la media más baja de RVI con un valor de 1.69.

Análisis de varianza de RVI por estados fenológicos

Se realizó una prueba Kruskal-Wallis, saber si existe una diferencia significativa entre los estados fenológicos de cada época de siembra, los resultados se muestran en la **Tabla 35**, además se puede visualizar los intervalos de confianza de cada análisis de varianza (**Tabla 36**).

Tabla 35

Análisis del índice RVI entre estados fenológicos de la primera y segunda época de siembra

Primera época					
Estado fenológico	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
Germinación	1.69	0.05	1.69	212.37	<0.0001
Desarrollo y macollamiento	3.18	0.2	3.24		
Formación de espiga y llenado de grano	3.17	0.16	3.19		
Madurez	1.96	0.24	1.94		
Segunda época					
Estado fenológico	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
Germinación	1.7	0.09	1.69	108.61	<0.0001
Desarrollo y macollamiento	1.96	0.21	1.92		
Formación de espiga y llenado de grano	1.98	0.09	1.97		
Madurez	1.83	0.18	1.8		

Tabla 36

Intervalos de confianza por estados fenológicos del índice RVI

Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Estado fenológico	95% de confianza		Estado fenológico	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
Germinación	1.6793	1.7041	Germinación	1.6792	1.7254
Desarrollo y maco-llamamiento	3.1289	3.2287	Desarrollo y maco-llamamiento	1.9071	2.0074
Formación de espiga y llenado de grano	3.1301	3.2063	Formación de espiga y llenado de grano	1.9593	2.0037
Madurez	1.9012	2.0167	Madurez	1.7892	1.8743

El p -valor fue menor de 0.05 por lo tanto se rechaza la H_0 , es decir, tiene una diferencia significativa entre los estados fenológicos de la primera (**Tabla 37**) y la segunda época de siembra (**Tabla 38**).

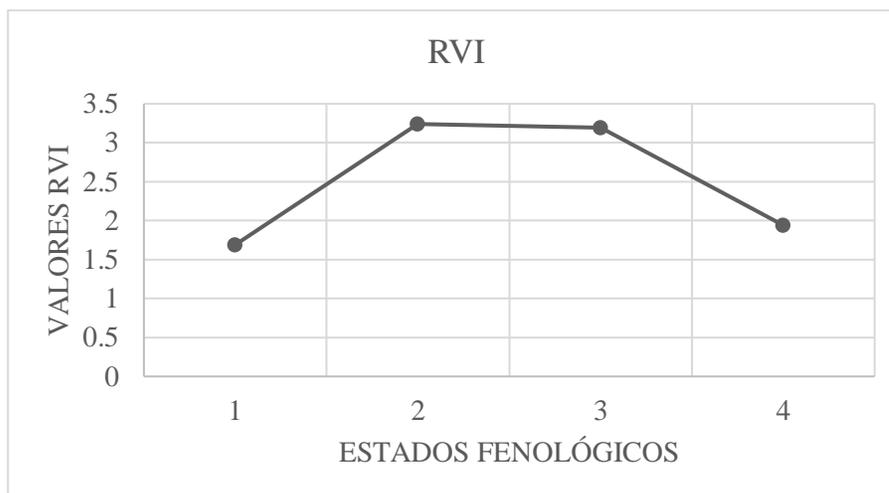
Tabla 37

Prueba Kruskal-Wallis del índice RVI de los estados fenológicos de la primera época de siembra

Estados fenológicos	Medianas	Rango
Desarrollo y maco-llamamiento	3.24	A
Formación de espiga y llenado de grano	3.19	A
Madurez	1.94	B
Germinación	1.69	C

Figura 22

Comportamiento del índice RVI a lo largo del desarrollo fenológico de la primera época de siembra



En la **Tabla 37** se evidencia que existe una diferencia significativa entre los estados fenológicos madurez y germinación con respecto al desarrollo y macollamiento, y formación de espiga y llenado de grano. Se puede observar que este índice de vegetación tiene el mismo comportamiento que el índice de vegetación $NDVI_{UAV}$, como se indica tanto en la **Figura 17** y **Figura 22** los valores en el segundo y tercer estado fenológico se mantienen.

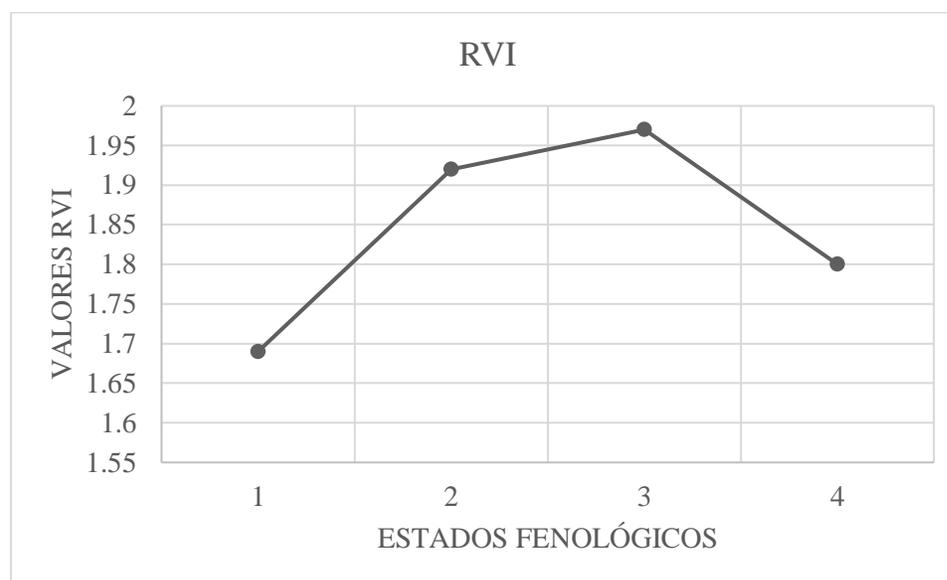
Tabla 38

Prueba Kruskal-Wallis del índice RVI de los estados fenológicos de la segunda época de siembra

Estados fenológicos	Medianas	Rango	
Formación de espiga y llenado de grano	1.97	A	
Desarrollo y macollamiento	1.92	A	
Madurez	1.80	B	
Germinación	1.69		C

Figura 23

Comportamiento del índice RVI a lo largo del desarrollo fenológico de la segunda época de siembra



En la segunda época de siembra se evidencia una diferencia significativa de los estados fenológicos madurez y germinación con respecto al desarrollo y macollamiento, y formación de espiga y llenado de grano. Se puede observar en la **Figura 23** que del primer al segundo estado fenológico hay un gran incremento del valor promedio de este índice, y del segundo al tercer estado fenológico existe un incremento menor del valor para finalmente tener una disminución en el estado de madurez como es el caso de los demás índices. El comportamiento del índice RVI es similar al comportamiento del índice NDVI tomado tanto con el sensor activo como con el sensor pasivo.

Análisis de varianza de SAVI por variedades.

Para poder aceptar o rechazar las hipótesis planteadas en el apartado 3.6.1 y el apartado 3.6.2, se realizó un análisis de varianza expuesto en la **Tabla 39** para la primera época, y **Tabla 40** para la segunda época, además en la **Tabla 41** se puede visualizar los intervalos de confianza de cada análisis de varianza.

Tabla 39

Análisis del SAVI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la primera época de siembra

Germinación					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.0024	7	3.40E-04	0.75	0.6269
Variedad	0.0024	7	3.40E-04	0.75	0.6269
Error	0.03	59	4.60E-04		
Total	0.03	66			
Desarrollo y maco-llamamiento					
Variedad	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
T1	0.79	0.03	0.80	8.02	0.3312
T2	0.78	0.03	0.77		
T3	0.77	0.04	0.77		
T4	0.76	0.05	0.77		
T5	0.78	0.05	0.80		
T6	0.76	0.03	0.77		
T7	0.79	0.03	0.80		
T8	0.76	0.04	0.78		
Formación de espiga y llenado de grano					
Variedad	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
T1	0.79	0.01	0.79	21.56	0.003
T2	0.78	0.01	0.78		
T3	0.75	0.04	0.77		
T4	0.75	0.04	0.75		
T5	0.78	0.01	0.78		
T6	0.77	0.02	0.79		
T7	0.8	0.01	0.81		
T8	0.78	0.03	0.79		
Madurez					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.14	7	0.02	4.36	0.0006
Variedad	0.14	7	0.02	4.36	0.0006
Error	0.28	59	0.0047		
Total	0.42	66			

Tabla 40

Análisis del SAVI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la segunda época de siembra

Germinación					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.01	7	9.90E-04	0.75	0.6285
Variedad	0.01	7	9.90E-04	0.75	0.6285
Error	0.08	58	0.0013		
Total	0.08	65			
Desarrollo y maco-llamiento					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.01	7	0.0018	0.35	0.9247
Variedad	0.01	7	0.0018	0.35	0.9247
Error	0.3	59	0.01		
Total	0.31	66			
Formación de espiga y llenado de grano					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.0045	7	0.00064	0.68	0.6849
Variedad	0.0045	7	0.00064	0.68	0.6849
Error	0.05	58	0.00094		
Total	0.06	65			
Madurez					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.1	7	0.01	5.69	0.0001
Variedad	0.1	7	0.01	5.69	0.0001
Error	0.14	55	0.0025		
Total	0.23	62			

Tabla 41

Intervalos de confianza por variedades del índice SAVI

GERMINACIÓN					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.3783	0.4046	T1	0.3638	0.4486
T2	0.3702	0.3983	T2	0.3554	0.3923
T3	0.3557	0.3980	T3	0.3593	0.4111
T4	0.3665	0.3927	T4	0.3711	0.4092
T5	0.3741	0.4158	T5	0.3513	0.4077
T6	0.3620	0.3950	T6	0.3566	0.4086
T7	0.3706	0.4047	T7	0.3527	0.3984
T8	0.3624	0.4052	T8	0.3547	0.4225
DESARROLLO Y MACO-LLAMIENTO					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.7688	0.8146	T1	0.4148	0.5105
T2	0.7538	0.7985	T2	0.3950	0.5352
T3	0.7322	0.7982	T3	0.4378	0.5303
T4	0.7236	0.8017	T4	0.4142	0.5332
T5	0.7374	0.8217	T5	0.4258	0.5458
T6	0.7292	0.7921	T6	0.4068	0.5435
T7	0.7664	0.8137	T7	0.4683	0.5385
T8	0.7260	0.8014	T8	0.3678	0.5585
FORMACIÓN DE ESPIGA Y LLENADO DE GRANO					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.7773	0.7982	T1	0.4707	0.5100
T2	0.7708	0.7924	T2	0.4603	0.5133
T3	0.7212	0.7856	T3	0.4819	0.5167
T4	0.7157	0.7772	T4	0.4575	0.5374
T5	0.7695	0.7863	T5	0.4629	0.5257
T6	0.7534	0.7946	T6	0.4502	0.4991
T7	0.7874	0.8097	T7	0.4874	0.5112
T8	0.7584	0.8098	T8	0.4461	0.5132

MADUREZ					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.4336	0.5273	T1	0.3717	0.4374
T2	0.4541	0.5399	T2	0.3546	0.4312
T3	0.4893	0.5912	T3	0.3835	0.4575
T4	0.4838	0.5844	T4	0.3682	0.4523
T5	0.3574	0.5246	T5	0.3851	0.5105
T6	0.3889	0.4705	T6	0.3512	0.4118
T7	0.3582	0.4692	T7	0.4651	0.5225
T8	0.3664	0.4926	T8	0.4264	0.5500

En la primera época de siembra para el estado fenológico de desarrollo y macollamiento y formación de espiga y llenado de grano se utilizó la prueba Kruskal-Wallis y para madurez y germinación se usó la prueba ANOVA, el p -valor fue menor de 0.05 en la formación de espiga y llenado de grano, y madurez, por lo tanto, se rechaza la H_0 , es decir, hubo una diferencia significativa. Para el tercer estado fenológico se utilizó Kruskal-Wallis para determinar la variedad que tiene diferencias (**Tabla 42**) y para el cuarto estado fenológico se utilizó LSD Fisher (**Tabla 43**).

En la segunda época de siembra se utilizó la prueba ANOVA para todos los estados fenológicos y solo en el estado de madurez el p -valor fue menor a 0.05 por lo que tiene una diferencia significativa la que se determinó usando una prueba LSD Fisher (**Tabla 44**).

Tabla 42

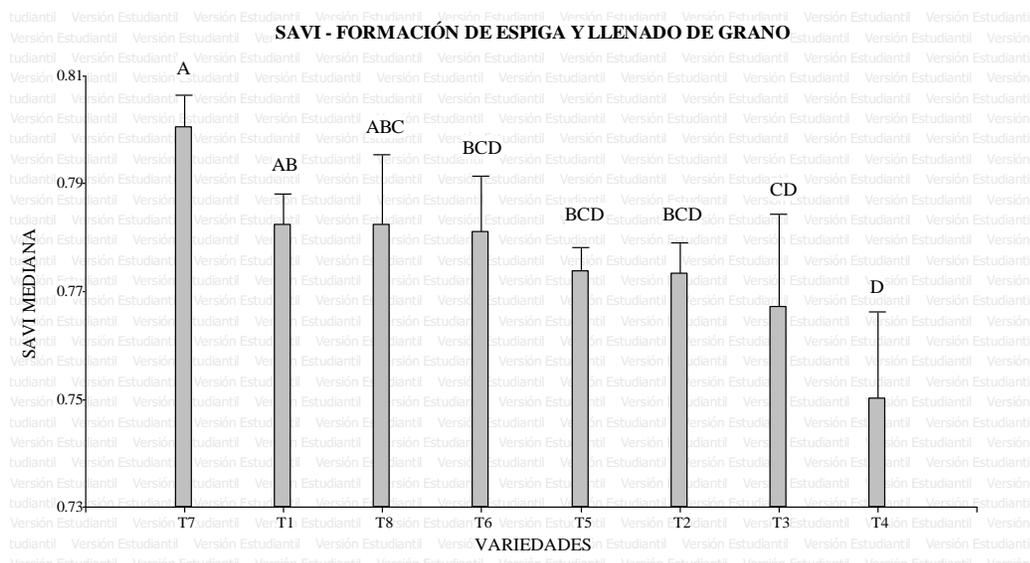
Prueba Kruskal-Wallis del índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra

Variedades	Medianas	Rango			
T7	0.81	A			
T1	0.79	A	B		
T8	0.79	A	B	C	
T6	0.79		B	C	D
T5	0.78		B	C	D
T2	0.78		B	C	D
T3	0.77			C	D

Variedades	Medianas	Rango
T4	0.75	D

Figura 24

Distribución de medianas para el índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano de la primera época de siembra



En la **Tabla 42** se demuestra que las variedades T7 y T4, tienen una diferencia significativa con respecto al resto de variedades, además las variedades T2, T5 y T6 comparten el rango BCD por lo que son estadísticamente parecidas. En la **Figura 24** la variedad que tiene rango C corresponde a la mediana de SAVI más baja con un valor de 0.75, mientras que las variedades que tienen rango A tienen los valores de medianas más altas con un valor de 0.80.

Tabla 43

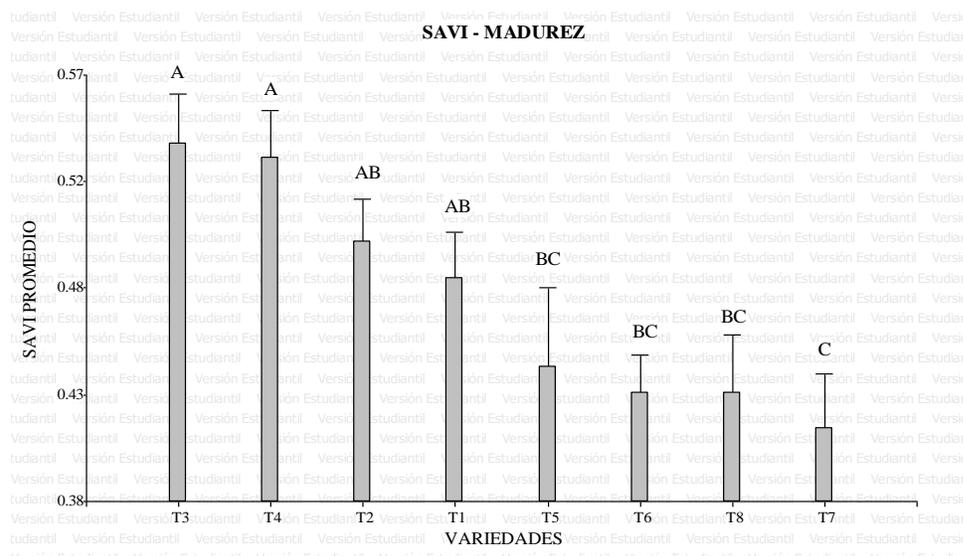
Prueba LSD Fisher del índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la primera época de siembra

Variedades	Medias	Rangos	
T3	0.54	A	
T4	0.53	A	
T2	0.5	A	B
T1	0.48	A	B
T5	0.44	B	C
T6	0.43	B	C
T8	0.43	B	C

Variedades	Medias	Rangos
T7	0.41	C

Figura 25

Distribución de medias para el índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la primera época de siembra



En esta etapa fenológica las variedades que tienen una diferencia significativa son la T3, T4 y T7. La T2, T1, T5, T6 y T8 comparten el rango de B, por lo que son estadísticamente iguales. Como se puede observar en la **Figura 25**, las variedades que pertenecen al rango A se diferencian debido a que tienen la media más alta de SAVI con un valor de 0.54, mientras que la variedad que tiene rango C tiene la media más baja con un valor de 0.41.

Tabla 44

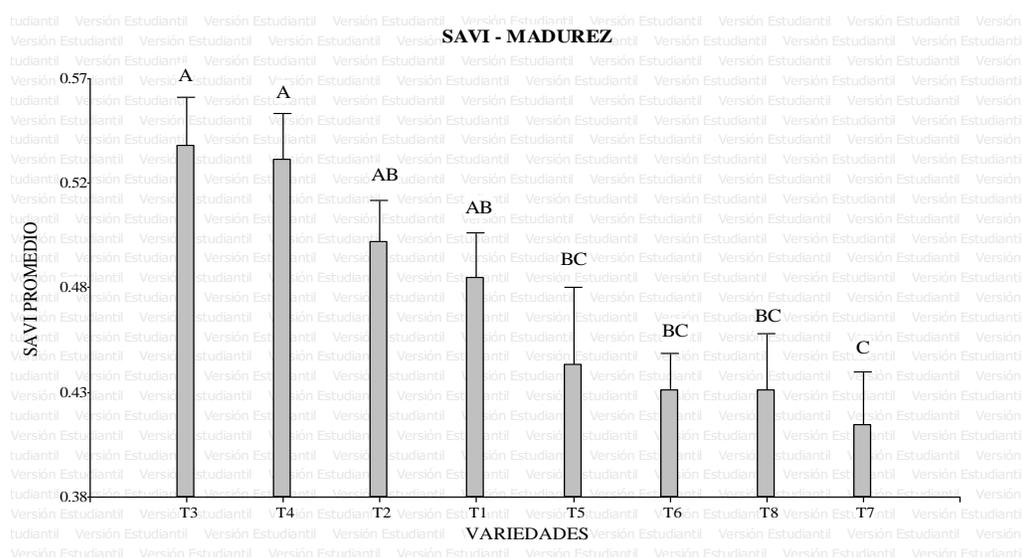
Prueba LSD Fisher del índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra

Variedades	Medias	Rangos	
T7	0.49	A	
T8	0.49	A	
T5	0.45	A	B
T3	0.42	B	C

Variedades	Medias	Rangos
T4	0.41	B C
T1	0.40	B C
T2	0.39	C
T6	0.38	C

Figura 26

Distribución de medias para el índice SAVI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra



En la segunda época de siembra en el estado fenológico de madurez se observa que las variedades T7, T8, T2 y T6 se diferencian estadísticamente con las otras variedades sembradas. Las variedades T5, T3, T4 y T1 comparten el mismo rango de B, es decir, que estadísticamente son similares. En la **Figura 26** se puede observar que la variedad con el rango A es la que presenta un mayor valor promedio de SAVI de 0.49, mientras que el rango C de 0.38 es el valor promedio más bajo de SAVI.

Análisis de varianza de SAVI por estados fenológicos

Se realizó una prueba Kruskal-Wallis, saber si existe una diferencia significativa entre los estados fenológicos de cada época de siembra, los resultados se muestran en la **Tabla 45**, además se puede visualizar los intervalos de confianza de cada análisis de varianza (**Tabla 46**).

Tabla 45

Análisis del índice SAVI entre estados fenológicos de la primera y segunda época de siembra

Primera época					
Estado fenológico	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
Germinación	0.38	0.02	0.38	210.62	<0.0001
Desarrollo y maco-llamiento	0.77	0.04	0.78		
Formación de espiga y llenado de grano	0.78	0.03	0.78		
Madurez	0.47	0.08	0.47		
Segunda época					
Estado fenológico	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
Germinación	0.39	0.04	0.38	110.95	<0.0001
Desarrollo y maco-llamiento	0.48	0.07	0.47		
Formación de espiga y llenado de grano	0.49	0.03	0.49		
Madurez	0.43	0.06	0.42		

Tabla 46

Intervalos de confianza por estados fenológicos del índice SAVI

Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Estado fenológico	95% de confianza		Estado fenológico	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
Germinación	0.3797	0.3900	Germinación	0.3765	0.3941
Desarrollo y maco-llamiento	0.7654	0.7841	Desarrollo y maco-llamiento	0.4609	0.4944

Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Estado fenológico	95% de confianza		Estado fenológico	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
Formación de espiga y llenado de grano	0.7688	0.7829	Formación de espiga y llenado de grano	0.4837	0.4985
Madurez	0.4534	0.4922	Madurez	0.4158	0.4468

El p -valor fue menor de 0.05 por lo tanto se rechaza la H_0 , es decir, tiene una diferencia significativa entre los estados fenológicos de la primera (**Tabla 47**) y la segunda época de siembra (**Tabla 48**).

Tabla 47

Prueba Kruskal-Wallis del índice SAVI de los estados fenológicos de la primera época de siembra

Estados fenológicos	Medianas	Rangos
Formación de espiga y llenado de grano	0.78	A
Desarrollo y maco-llamamiento	0.78	A
Madurez	0.47	B
Germinación	0.38	C

Figura 27

Comportamiento del índice SAVI a lo largo del desarrollo fenológico de la primera época de siembra



En la primera época de siembra se evidencia una diferencia significativa de los estados fenológicos madurez y germinación con respecto al desarrollo y macollamiento, y formación de espiga y llenado de grano. Como se puede observar en la **Figura 27** el comportamiento del SAVI sigue el mismo comportamiento del NDVI a lo largo de los estados fenológicos del cultivo, aunque el índice SAVI tiene valores más altos que el NDVI al igual que en el estudio de Tello, (2016).

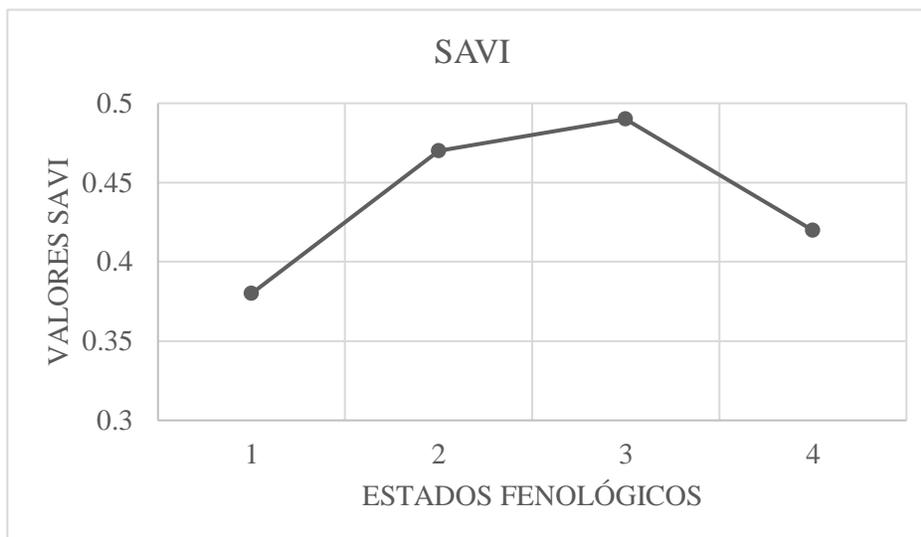
Tabla 48

Prueba Kruskal-Wallis del índice SAVI de los estados fenológicos de la segunda época de siembra

Estados fenológicos	Medianas	Rangos
Formación de espiga y llenado de grano	0.49	A
Desarrollo y macollamiento	0.47	A
Madurez	0.42	B
Germinación	0.38	C

Figura 28

Comportamiento del índice SAVI a lo largo del desarrollo fenológico de la segunda época de siembra



En la **Tabla 48** se evidencia que en la segunda época de siembra existe una diferencia significativa de los estados fenológicos madurez y germinación con respecto al desarrollo y maco-llamiento, y formación de espiga y llenado de grano. En la **Figura 28** se visualiza la misma tendencia que del índice de vegetación RVI, NDVI_S y NDVI_{UAV}, es decir, los valores de estos índices aumentan hasta el tercer estado fenológico y luego disminuyen en el cuarto estado fenológico.

Análisis de varianza de VARI por variedades

Para poder aceptar o rechazar las hipótesis planteadas en los apartados 3.6.1 y 3.6.2, se realizó un análisis de varianza expuesto en la **Tabla 49** para la primera época, y **Tabla 50** para la segunda época, además en la **Tabla 51** se puede visualizar los intervalos de confianza de cada análisis de varianza.

Tabla 49

Análisis del VARI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la primera época de siembra

Germinación					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor

Modelo	0.0031	7	4.50E-04	0.69	0.6766
Variedad	0.0031	7	4.50E-04	0.69	0.6766
Error	0.04	59	6.50E-04		
Total	0.04	66			
Desarrollo y maco-llamamiento					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.01	7	0.0014	1.44	0.2087
Variedad	0.01	7	0.0014	1.44	0.2087
Error	0.06	59	0.00096		
Total	0.07	66			
Madurez					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.0039	7	0.00056	1.16	0.3379
Variedad	0.0039	7	0.00056	1.16	0.3379
Error	0.03	59	0.00048		
Total	0.03	66			

Nota. Por problemas técnicos no se pudo obtener las imágenes en RGB de la etapa fenológica formación de espiga y llenado de grano.

Tabla 50

Análisis del VARI de las variedades en los estados fenológicos de la cebada para la segunda época de siembra

Germinación					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.0015	7	2.20E-04	0.64	0.7186
Variedad	0.0015	7	2.20E-04	0.64	0.7186
Error	0.02	59	3.40E-04		
Total	0.02	66			
Desarrollo y maco-llamamiento					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.0032	7	0.00045	0.7	0.6694
Variedad	0.0032	7	0.00045	0.7	0.6694
Error	0.04	59	0.00064		
Total	0.04	66			

Formación de espiga y llenado de grano					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.01	7	7.40E-04	1.79	0.106
Variedad	0.01	7	7.40E-04	1.79	0.106
Error	0.02	58	4.10E-04		
Total	0.03	65			
Madurez					
Factor de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor de corrección	p-valor
Modelo	0.01	7	8.20E-04	3.89	0.0016
Variedad	0.01	7	8.20E-04	3.89	0.0016
Error	0.01	55	2.10E-04		
Total	0.02	62			

Tabla 51

Intervalos de confianza por variedades del índice VARI

GERMINACIÓN					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.076	0.1192	T1	0.0126	0.0454
T2	0.0683	0.1028	T2	0.0041	0.0282
T3	0.0553	0.1068	T3	0.0068	0.022
T4	0.0724	0.0945	T4	0.0089	0.0392
T5	0.0694	0.1201	T5	0.0035	0.0395
T6	0.0577	0.0929	T6	0.0046	0.0255
T7	0.0692	0.106	T7	0.0046	0.0328
T8	0.0637	0.1008	T8	0.0002	0.0411
DESARROLLO Y MACO-LLAMIENTO					
Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
T1	0.0898	0.1428	T1	0.0314	0.0804
T2	0.0727	0.1149	T2	0.0218	0.0536
T3	0.0655	0.1328	T3	0.0315	0.0697
T4	0.069	0.1008	T4	0.0235	0.0643
T5	0.0737	0.1354	T5	0.0326	0.0771
T6	0.0596	0.1028	T6	0.0235	0.0621
T7	0.0858	0.1211	T7	0.0434	0.0726

T8		0.059	0.1012	T8		0.0297	0.078
FORMACIÓN DE ESPIGA Y LLENADO DE GRANO							
Primera época de siembra				Segunda época de siembra			
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza			
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior		
T1	-	-	T1	0.0427	0.0735		
T2	-	-	T2	0.0328	0.0633		
T3	-	-	T3	0.0444	0.078		
T4	-	-	T4	0.0338	0.0665		
T5	-	-	T5	0.0481	0.0846		
T6	-	-	T6	0.0218	0.0607		
T7	-	-	T7	0.0592	0.0793		
T8	-	-	T8	0.0397	0.0795		
MADUREZ							
Primera época de siembra				Segunda época de siembra			
Variedad	95% de confianza		Variedad	95% de confianza			
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior		
T1	-0.032	-0.0024	T1	-0.0001	0.0179		
T2	-0.0351	0.0102	T2	-0.003	0.0181		
T3	-0.0143	0.0206	T3	0.003	0.0225		
T4	-0.0204	0.0188	T4	0.0002	0.0248		
T5	-0.0182	0.0207	T5	0.0003	0.0412		
T6	-0.0189	0.0149	T6	-0.0052	0.0147		
T7	-0.0095	0.0168	T7	0.0243	0.0414		
T8	-0.0113	0.0137	T8	0.0111	0.0425		

En la segunda época de siembra, solo en el estado de madurez el p -valor fue menor a 0.05 por lo que tiene una diferencia significativa, debido a esto, se procedió a realizar una prueba LSD Fisher al 95% de confianza, resultados que se visualizan en la **Tabla 52**.

Tabla 52

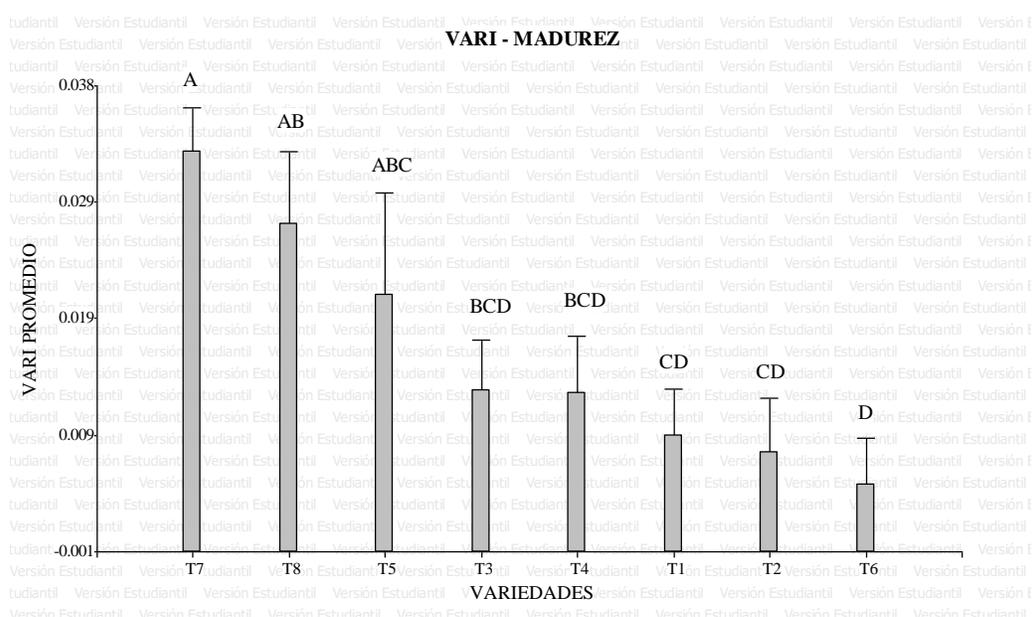
Prueba LSD Fisher del índice VARI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra

Variedades	Medias	Rango		
T7	0.03	A		
T8	0.03	A	B	
T5	0.02	A	B	C

Variedades	Medias	Rango		
T3	0.01	B	C	D
T4	0.01	B	C	D
T1	0.01		C	D
T2	0.01		C	D
T6	0.0047			D

Figura 29

Distribución de medias para el índice VARI de las variedades en la etapa fenológica madurez de la segunda época de siembra



En esta etapa fenológica las variedades que tienen una diferencia significativa son la T6 y T7, las variedades T2, T1, T4, T3 y T5 son estadísticamente similares al pertenecer al mismo rango de C y la T8 es estadísticamente similar a la T5, debido a que T5 comparte los rangos A, B y C. En la **Figura 29**, en el estado fenológico madurez se puede observar que el valor promedio más alto es 0.03 que pertenece al rango A y el valor promedio más bajo es 0.0047 que pertenece al rango D.

Análisis de varianza de VARI por estados fenológicos

Se realizó una prueba Kruskal-Wallis, saber si existe una diferencia significativa entre los estados fenológicos de cada época de siembra, los resultados se muestran en

la **Tabla 53**, además se puede visualizar los intervalos de confianza de cada análisis de varianza (**Tabla 54**).

Tabla 53

Análisis del índice VARI entre estados fenológicos de la primera y segunda época de siembra

Primera época					
Estado fenológico	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
Germinación	0.09	0.02	0.09	132.84	<0.0001
Desarrollo y macollamiento	0.1	0.03	0.1		
Madurez	-0.0034	0.02	-0.0049		
Segunda época					
Estado fenológico	Medias	Desviación estándar	Medianas	H	p-valor
Germinación	0.02	0.02	0.02	117.76	<0.0001
Desarrollo y macollamiento	0.05	0.02	0.05		
Formación de espiga y llenado de grano	0.06	0.02	0.06		
Madurez	0.02	0.02	0.02		

Tabla 54

Intervalos de confianza por estados fenológicos del índice VARI

Primera época de siembra			Segunda época de siembra		
Estado fenológico	95% de confianza		Estado fenológico	95% de confianza	
	Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
Germinación	0.0804	0.0925	Germinación	0.0161	0.0249
Desarrollo y macollamiento	0.0889	0.1044	Desarrollo y macollamiento	0.0441	0.0563
Formación de espiga y llenado de grano	-	-	Formación de espiga y llenado de grano	0.0524	0.0628
Madurez	-0.0087	0.002	Madurez	0.012	0.0204

El p -valor fue menor de 0.05 por lo tanto se rechaza la H_0 , es decir, tiene una diferencia significativa entre los estados fenológicos de la primera (**Tabla 55**) y la segunda época de siembra (**Tabla 56**).

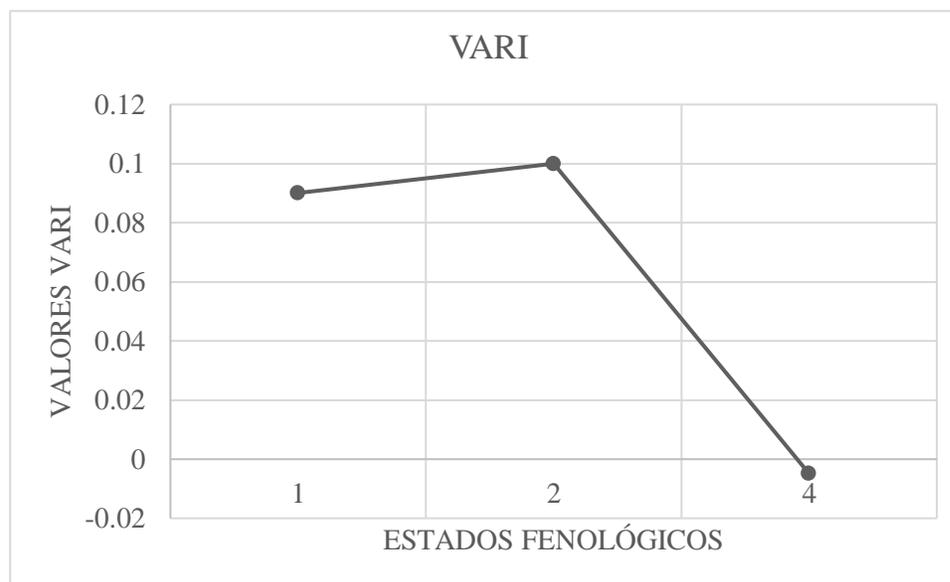
Tabla 55

Prueba Kruskal-Wallis del índice VARI de los estados fenológicos de la primera época de siembra

Estados fenológicos	Medianas	Rango
Desarrollo y maco-llamiento	0.1	A
Madurez	-0.0034	B
Germinación	0.09	B

Figura 30

Comportamiento del índice VARI a lo largo del desarrollo fenológico de la primera época de siembra



En la **Tabla 55** se evidencia que la primera época de siembra hay una diferencia significativa entre los 3 estados fenológicos del cultivo de cebada. Como se observa en la **Figura 30** hay un aumento del valor del índice VARI entre el estado de germinación y desarrollo y maco-llamiento, decreciendo el valor de VARI para la etapa de madurez.

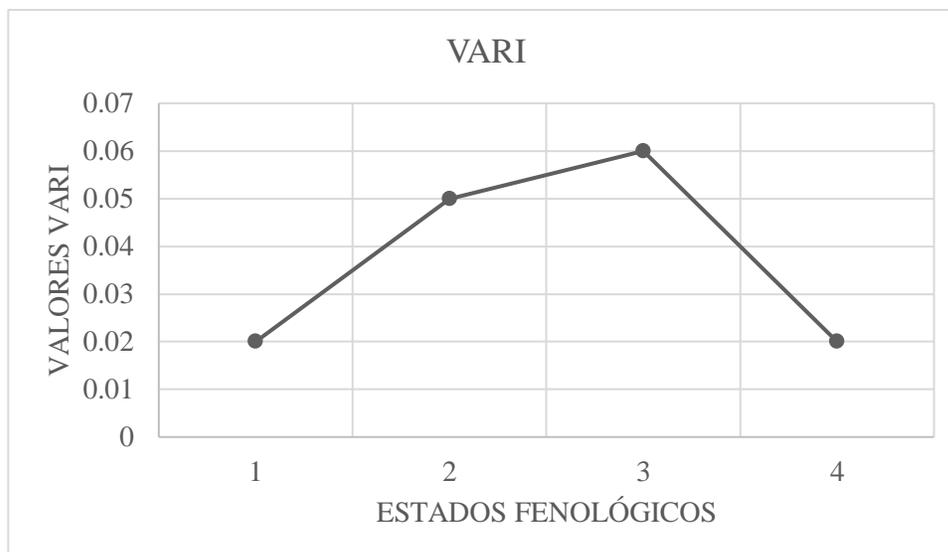
Tabla 56

Prueba Kruskal-Wallis del índice VARI de los estados fenológicos de la segunda época de siembra

Estados fenológicos	Medianas	Rango
Formación de espiga y llenado de grano	0.06	A
Desarrollo y maco-llamiento	0.05	A
Madurez	0.02	B
Germinación	0.02	B

Figura 31

Comportamiento del índice VARI a lo largo del desarrollo fenológico de la segunda época de siembra



En la segunda época de siembra se evidencia una diferencia significativa de los estados fenológicos madurez y germinación con respecto al desarrollo y maco-llamiento, y formación de espiga y llenado de grano. En la **Figura 31** se puede observar que el comportamiento del índice VARI es similar al de los índices RVI, SAVI, NDVI_S y NDVI_{UAV}, en la segunda época de siembra, teniendo un incremento de 0.01 entre la etapa de desarrollo y maco-llamiento y formación de espiga y llenado de grano.

Biomasa

Cálculo del Factor de Densidad (FD) para cada parcela

Se realizó un muestreo de 34 parcelas para obtener el factor de densidad, el mismo que se extrapoló para las parcelas faltantes, tomando en cuenta que sean del mismo tratamiento y están presentados en la **Tabla 57**.

Tabla 57

Cálculo del factor de densidad

Parcela	Peso (Kg)	Factor de densidad (kg/m ³)	Parcela	Peso (Kg)	Factor de densidad (kg/m ³)
T1Z2R3	0.0714	0.5213	T6Z2R3	0.0713	0.3276
T2Z3R1	0.0510	0.3675	T6Z3R1	0.0456	0.2419
T3Z3R1	0.0758	1.2342	T7Z1R1	0.0696	0.1997
T3Z3R2	0.0229	0.2426	T7Z1R2	0.0751	0.3111
T3Z3R3	0.0437	0.3157	T7Z2R1	0.0572	0.1584
T4Z2R1	0.0423	0.4639	T7Z2R2	0.1477	0.4445
T4Z2R2	0.0391	0.2454	T7Z2R3	0.0847	0.2253
T4Z3R2	0.0577	0.6025	T7Z2R4	0.0668	0.1935
T5Z1R1	0.0717	0.2738	T7Z3R1	0.0859	0.5532
T5Z1R2	0.0990	0.3436	T7Z3R2	0.0789	0.4292
T5Z2R2	0.0536	0.3131	T7Z3R3	0.0726	0.2516
T5Z3R1	0.0821	0.5317	T8Z1R1	0.0675	0.1945
T5Z3R3	0.0824	0.3044	T8Z1R2	0.0712	0.2808
T6Z1R1	0.0450	0.1808	T8Z2R1	0.0950	0.6502
T6Z1R2	0.0773	0.4572	T8Z2R2	0.0606	0.2732
T6Z2R1	0.0385	0.2828	T8Z2R3	0.0704	0.1999
T6Z2R2	0.0208	0.1009	T8Z3R1	0.0911	0.6012

La mayor cantidad de peso absoluto, es decir restado el peso en húmedo con el peso seco, se obtuvo en la parcela T5Z1R2, y el mayor valor para factor de densidad se obtuvo en la parcela T3Z3R1, por otro lado, el menor valor de peso absoluto y menor valor del factor de densidad fue el de la parcela T6Z2R2.

Cálculo del volumen de la unidad experimental

En la **Tabla 58** y **Tabla 59** se encuentran los resultados del promedio del volumen de cada parcela por tratamiento, tomando en cuenta que se descartaron los valores atípicos de cada variedad de las dos épocas de siembra.

Tabla 58

Cálculo del volumen por variedades para la primera época de siembra

Germinación		Formación de espiga y llenado de grano	
Variedades	Volumen (m³)	Variedades	Volumen (m³)
T1	18.2953	T1	52.7788
T2	19.2421	T2	53.0864
T3	16.7999	T3	51.1721
T4	16.6162	T4	49.0682
T5	16.6924	T5	47.8114
T6	16.6045	T6	47.4163
T7	16.6052	T7	44.8754
T8	14.5703	T8	39.8677

Desarrollo y maco-llamiento		Madurez	
Variedades	Volumen (m³)	Variedades	Volumen (m³)
T1	34.0966	T1	41.5432
T2	33.9869	T2	43.9039
T3	31.5174	T3	41.9158
T4	30.1684	T4	42.3299
T5	28.7185	T5	41.5176
T6	27.7036	T6	37.7058
T7	27.4461	T7	36.6525
T8	24.3723	T8	33.9782

En la primera época de siembra los dos últimos estados fenológicos formación de espiga y llenado de grano, y madurez son los que tienen la mayor cantidad de volumen, aunque disminuye la cantidad de volumen en algunas variedades en la etapa

de madurez. En la última etapa fenológica la variedad T2 es la variedad con mayor volumen.

Tabla 59

Cálculo del volumen por variedades para la segunda época de siembra

Germinación		Formación de espiga y llenado de grano	
Variedades	Volumen (m³)	Variedades	Volumen (m³)
T1	5.4515	T1	15.3762
T2	4.6497	T2	11.2929
T3	4.0342	T3	10.6104
T4	3.7384	T4	7.6723
T5	4.1998	T5	12.3423
T6	4.3029	T6	11.5983
T7	3.6756	T7	9.5356
T8	8.29	T8	12.35

Desarrollo y maco-llamiento		Madurez	
Variedades	Volumen (m³)	Variedades	Volumen (m³)
T1	13.1929	T1	13.4868
T2	10.8518	T2	10.1937
T3	11.9289	T3	9.7186
T4	9.2037	T4	1.6896
T5	12.0508	T5	11.6133
T6	13.0062	T6	22.735
T7	9.8483	T7	34.4327
T8	15.5319	T8	55.19

En la segunda época de siembra los tres últimos estados fenológicos, el volumen se mantiene casi sin variación en todas las variedades de cebada, a excepción de la T4, porque su valor disminuye en la etapa de madurez, por otro lado, la variedad T8 presentó mayor volumen en la etapa de madurez.

Estimación de biomasa por parcela

En la **Tabla 60** y **Tabla 61** se encuentran los valores estimados de biomasa de cada variedad para la primera y segunda época de siembra.

Tabla 60

Estimación de la biomasa por variedades de la primera época de siembra

Germinación		Formación de espiga y llenado de grano	
Variedades	Biomasa (kg)	Variedades	Biomasa (kg)
T1	8.2074	T1	23.7462
T2	8.628	T2	23.8829
T3	7.543	T3	23.0324
T4	7.4613	T4	22.0976
T5	7.4952	T5	21.5392
T6	7.4561	T6	21.3636
T7	7.3777	T7	19.9381
T8	6.4736	T8	17.7132

Desarrollo y maco-llamiento		Madurez	
Variedades	Biomasa (kg)	Variedades	Biomasa (kg)
T1	15.3114	T1	18.6484
T2	15.2626	T2	19.6972
T3	14.1655	T3	18.8139
T4	13.5661	T4	18.9979
T5	12.9219	T5	18.637
T6	12.471	T6	16.9434
T7	12.1943	T7	16.2847
T8	10.8286	T8	15.0965

En la primera época de siembra todas las variedades tienen una disminución en su valor de biomasa en la etapa de madurez.

Tabla 61*Estimación de la biomasa por variedades de la segunda época de siembra*

Germinación		Formación de espiga y llenado de grano	
Variedades	Biomasa (kg)	Variedades	Biomasa (kg)
T1	2.4391	T1	6.8792
T2	2.0283	T2	4.8583
T3	2.0093	T3	5.5263
T4	1.6826	T4	3.4679
T5	1.2701	T5	4.1778
T6	1.1406	T6	2.9932
T7	1.036	T7	2.6062
T8	2.0845	T8	3.178

Desarrollo y maco-llamiento		Madurez	
Variedades	Biomasa (kg)	Variedades	Biomasa (kg)
T1	5.9211	T1	6.1115
T2	4.776	T2	4.3712
T3	6.9467	T3	5.1202
T4	3.9759	T4	3.2804
T5	4.0587	T5	5.6775
T6	3.2914	T6	3.0777
T7	2.8283	T7	6.9206
T8	4.3798	T8	7.8327

Los resultados para la segunda época de siembra indican que las variedades T1, T2, T3, T4 tienen una disminución en su cantidad de biomasa en la época de madurez, por otro lado, las variedades T5, T6, T7 y T8 aumentan su cantidad de biomasa.

Como se puede observar en los resultados, existe una disminución del volumen del tercer al cuarto estado fenológico, esto puede ser debido a la influencia del viento, causante de que el cultivo de cebada tenga una inclinación hacia los lados, este fenómeno se lo conoce como acame, este provoca que disminuya la altura del cultivo

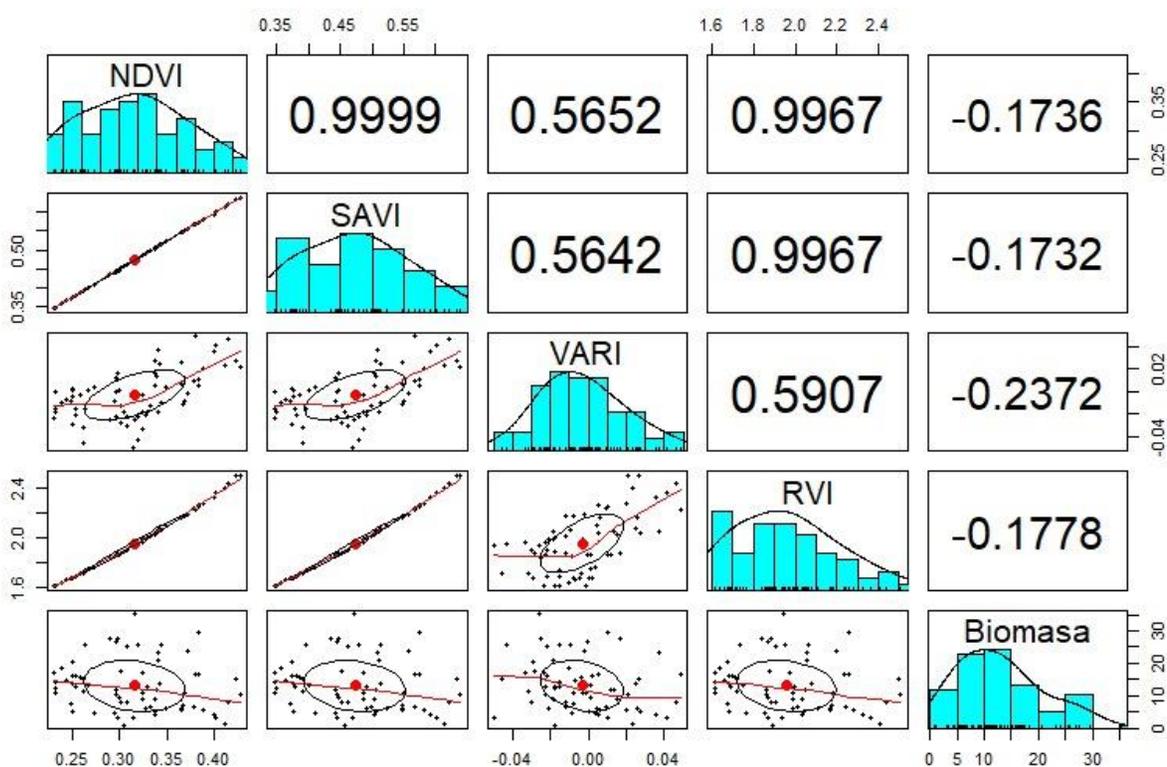
que se ve reflejada en el momento de la toma de las imágenes (Bendiga et al., 2014). Otra de las razones puede ser que al momento de pasar a la etapa de madurez el grano se seca, perdiendo la humedad que tenía en las primeras etapas fenológicas.

Regresión lineal

Debido a que se comprobó que las variables para el análisis de regresión no tenían una distribución normal, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), para conocer la intensidad de la relación lineal entre estas variables, los resultados se pueden observar en la **Figura 32** y **Figura 33**. Para explicar el comportamiento de la variable biomasa con respecto a cada índice de vegetación se realizó el análisis de regresión lineal, es decir, se modeló de forma matemática dichas variables como se puede observar en la **Tabla 62**.

Figura 32

Análisis de correlación para la primera época de siembra

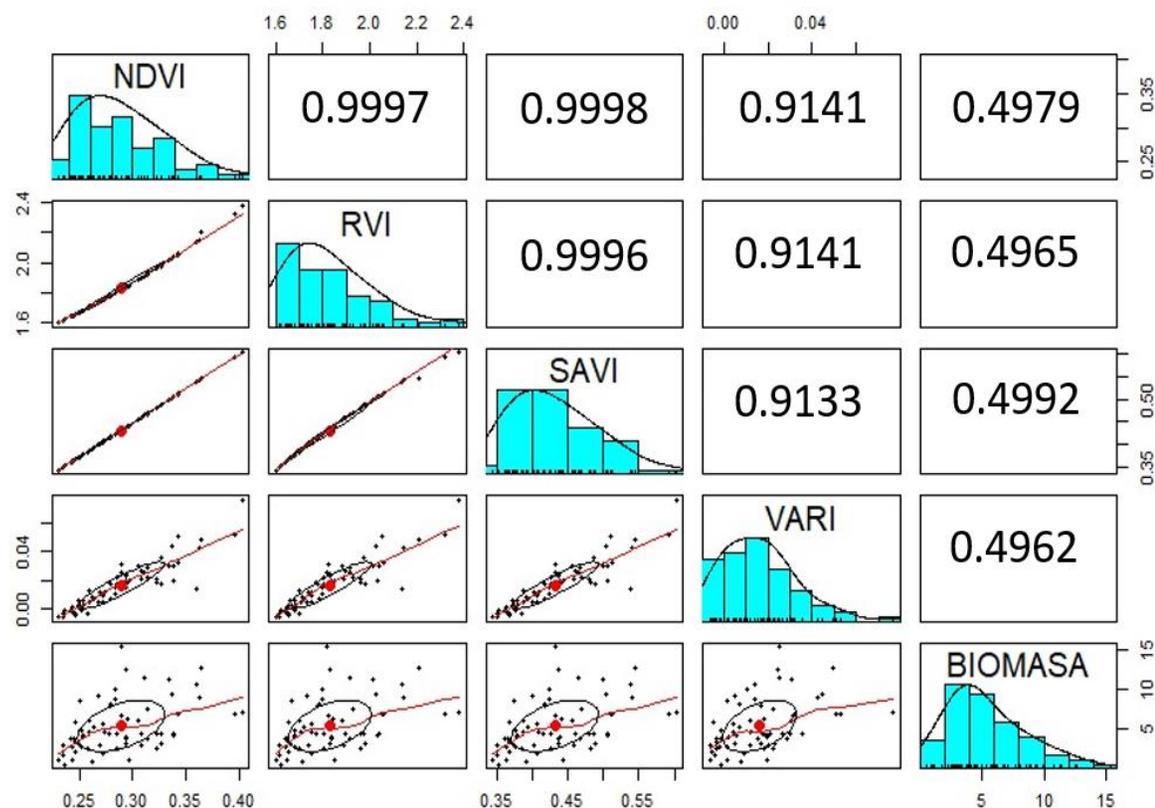


En la **Figura 32** para la primera época de siembra se obtuvo el rango del coeficiente de Spearman, que varía desde -0.1732 a -0.2372, lo que quiere decir que tiene una correlación negativa media, al ser negativa indica que cuando el índice de vegetación aumenta el valor de biomasa disminuye.

Con respecto a la correlación entre índices de vegetación que se observan que los índices que tienen correlación positiva perfecta son: NDVI - SAVI, RVI - SAVI y NDVI - RVI, que son los índices basados en el infrarrojo, mientras que el índice VARI con los índices SAVI, NDVI, RVI tiene una correlación positiva considerable, esto puede ser debido a que el VARI es un índice basado en el espectro visible.

Figura 33

Análisis de correlación para la segunda época de siembra



En la **Figura 33** se puede observar que el coeficiente de Spearman entre los índices de vegetación y biomasa, están en un rango de 0.4952 a 0.4979, indicando que tienen una correlación positiva media, esto quiere decir que cuando incrementa el valor de los índices de vegetación también incrementará el valor de la biomasa, coincidiendo

con el estudio de Bendig et al. (2015), donde indica que los índices de vegetación explican de una manera muy débil el comportamiento que tiene la biomasa en el cultivo de cebada.

Para la segunda época de siembra los coeficientes de Spearman entre los 4 índices de vegetación son mayores a 0.90, lo que significa que tienen una correlación positiva perfecta, algo que se puede destacar es que, a pesar de tener una correlación positiva perfecta, los valores más bajos de correlación pertenecen al índice VARI en relación con los otros índices: VARI – NDVI, VARI – RVI y VARI – SAVI.

Comparando los coeficientes de correlación de la primera y segunda época de siembra, se puede notar una gran diferencia debido a que la segunda época tiene una correlación positiva, cuando debería tener una correlación negativa, al ser el último estado fenológico de madurez la cebada debería tener un bajo índice de vegetación y un alto valor de biomasa para la cosecha. Esto puede deberse a que en la segunda época de siembra la cantidad de biomasa es menor comparado con la primera época.

Tabla 62

Análisis de regresión lineal entre los índices de vegetación y la biomasa

Ecuaciones de regresión lineal				
Índices de vegetación	Primera época de siembra	R ²	Segunda época de siembra	R ²
NDVI	$y = -25.463 x + 21.104$	0.0301	$y = 35.876 x - 4.936$	0.2080
RVI	$y = -5.880 x + 24.574$	0.0316	$y = 8.188 x - 9.550$	0.2006
SAVI	$y = -17.040 x + 21.111$	0.0299	$y = 23.962 x - 4.907$	0.2079
VARI	$y = -84.296 x + 12.770$	0.0562	$y = 86.641 x + 4.018$	0.2009

En la **Tabla 62** se puede observar las ecuaciones para estimar la biomasa, en la segunda época de siembra el coeficiente de determinación es más elevado que la primera época, pero aun así los valores son muy bajos como para decir que los modelos matemáticos explican de manera correcta a la variable a predecir.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

En este estudio se utilizó una Cámara RGB modificada MAPIR 3W (sensor pasivo) y un sensor de cultivo GreenSeeker (sensor activo) para conocer si son capaces de diferenciar etapas fenológicas y variedades sembradas utilizando índices de vegetación (NDVI, SAVI, RVI y VARI), además se pudo estimar la biomasa mediante el sensor pasivo y determinar su correlación con los índices mencionados.

Conclusiones

Tras el análisis estadístico se pudo evidenciar que el sensor de cultivo GreenSeeker fue capaz de distinguir entre los 4 estados fenológicos en la segunda época de siembra, mientras que en la primera época de siembra el sensor pudo distinguir 3 estados fenológicos, pero no pudo diferenciar entre los estados desarrollo y maco-llamiento y formación de espiga y llenado de grano, por tanto, se perfila como una herramienta útil para caracterizar estados fenológicos en cebada.

Con respecto a la cámara RGB modificada MAPIR 3W para los índices NDVI, RVI y SAVI pudo distinguir 3 estados fenológicos, en ambas etapas, pero no presentó diferencias entre los estados desarrollo y maco-llamiento y formación de espiga y llenado de grano, identificándolos como un mismo estado. En cuanto al VARI, único índice basado en las bandas visibles, no pudo distinguir los estados fenológicos de germinación y madurez, tomándolos como un mismo estado fenológico. Por tanto, se pudo evidenciar que los índices basados en infrarrojo fueron más eficientes para distinguir estados fenológicos que los los índices basados en el rango visible.

En cuanto a variedades sembradas, el sensor pasivo fue capaz de captar diferencias significativas en las dos últimas etapas fenológicas de la primera época de siembra. En esta época se pudo evidenciar que la variedad T7 (Cañicapa con fertilización) tuvo una vigorosidad más alta en el tercer estado fenológico y más baja en el cuarto estado fenológico, esto coincide con el normal desarrollo del cultivo. En cambio, para la segunda época no se pudo evidenciar este comportamiento en la citada variedad y solo se encontraron diferencias significativas en el cuarto estado fenológico. La variedad que mejor se adaptó a la segunda época fue T6 (IASA sin fertilización).

Se evidencia una diferencia significativa entre el uso y no uso de fertilizante, en las variedades T3 (Harrison con fertilización) en la primera época de siembra y T7

(Cañicapa con fertilización) en la segunda época de siembra, esto puede ser debido al uso integrado de fertilizantes en prácticas agrícolas.

Con respecto a los índices de vegetación NDVI y SAVI, se puede observar que tienen un comportamiento similar a lo largo de los estados fenológicos, esto se puede evidenciar con los valores del coeficiente de correlación para las dos épocas de siembra, que indica que tienen una correlación positiva perfecta, con la diferencia de que el SAVI presenta valores más altos que los del NDVI, esto puede ser porque el SAVI es el NDVI corregido.

En la estimación de biomasa se puede apreciar una diferencia entre las dos épocas de siembra, obteniendo los valores más altos en la primera época de siembra, y los valores más bajos en la segunda época de siembra, esto puede ser debido a que la segunda época de siembra se desarrolló en condiciones climáticas diferentes (época húmeda y seca).

La variedad T1 (INIAP con fertilización) obtuvo el mayor valor de biomasa y la T4 (Harrison sin fertilización) obtuvo el menor valor en la primera época de siembra, mientras que en la segunda época de siembra la variedad T8 (Cañicapa sin fertilización) obtuvo el mayor valor de biomasa, y la T6 (IASA sin fertilización) el menor valor.

Se puede concluir que los índices de vegetación son capaces de explicar de forma muy débil la cantidad de biomasa presente en el cultivo de cebada debido a que presentaron una correlación media.

Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios similares en plantaciones de cebada a gran escala, y así tener una noción real de los problemas que enfrenta el agricultor con este cultivo.

Se recomienda el uso de otros sensores remotos, como un espectroradiómetro de mano para poder construir una biblioteca de firmas espectrales para futuros trabajos sobre cebada en el campo de la agricultura de precisión.

En el caso de que se replique este estudio, se recomienda añadir más variables de estudio, como riego, luminosidad y pendiente, para conocer cómo influyen estas variables en el comportamiento de la cebada.

Se recomienda usar cámaras multiespectrales con bandas separadas como es el caso de la Parrot Sequoia ya que permite tener una resolución de imágenes más detallada.

Referencias Bibliográficas

- Aerial Insights. (2019). *¿Qué es y cómo funciona una cámara multiespectral?*. <https://www.aerial-insights.co/blog/camara-multiespectral/>
- Alhammadi, M. S., & Glenn, E. P. (2008). Detecting date palm trees health and vegetation greenness change on the eastern coast of the United Arab Emirates using SAVI. *International Journal of Remote Sensing*, 29(6), 1745-1765. <https://doi.org/10.1080/01431160701395195>
- Anderson, D. R., Sweeney, D. J., & Williams, T. A. (2008). *Estadística para administración y economía*. (10ma ed.). México: International Thomson Editores.
- Arnó, J., Casasnovas, J. A., & Escolá, A. (2017a). ¿Qué nos dicen los sensores sobre los cultivos? *New AG International*, Diciembre, 16–20.
- Arnó, J., Casasnovas, J. A., & Escolá, A. (2017b). Monitoreo por sensores en la Agricultura de Precisión: Lo que los sensores nos dicen sobre las condiciones ambientales de los cultivos. *New AG International*, Oct/Nov 20.
- Arriola-Valverde, S., Ferencz-Appel, A., & Rimolo-Donadio, R. (2018). Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos autónomos no tripulados. *Investiga.TEC*, 0(31), 4.
- Barrientos, A., Del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., & Rossi, C. (2009). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. *Grupo de Robótica y Cibernética, Universidad Politécnica de Madrid*, 1–29. <http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf>
- Basantes, E. (2015). *Manejo cultivos andinos del Ecuador* (5.a ed.). Universidad de las Fuerzas Armadas. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10163/4/Manejo%20Cultivos%20Ecuador.pdf>
- BCE (BANCO CENTRAL DEL ECUADOR). (2019). *Evolución de la Balanza Comercial del Ecuador por país*.
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395–10412. <https://doi.org/10.3390/rs61110395>

- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., ... & Bareth, G. (2015). Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>
- Berrío, V., Alzate, D., Ramón, J. & Ramón, J. (2018). Sistema de optimización de las técnicas de planificación en agricultura de precisión por medio de drones. *REVISTA ESPACIOS*, 39(45), 18.
- Bortolot, Z. J., & Wynne, R. H. (2005). Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(6), 342–360. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.07.001>
- Balasundram, S., Memarian, H. & Khosla, R. (2013). Estimating oil palm yields using vegetation indices derived from Quickbird. *Life Sci. J*, 10(4), 851-860.
- Buill, F., Nuñez, M. & Rodríguez, J. (2003). *Fotogrametría analítica*. Universidad Politécnica de Catalunya, SL.
- Caballero, D. (2017). Aplicación de imágenes NDVI para el control de riego y enfermedad en cultivos Agrícolas mediante el uso de aeronaves no tripuladas (UAV) y el software AgVault. *Aporte Santiaguino*, 10(2), 305-314. <http://dx.doi.org/10.32911/as.2017.v10.n2.172>
- Camargo, J. (2011). *Estudio Y Diseño de Metodología con Técnicas GPS para la actualización de la Cartografía Catastral del Municipio Palavecino (Venezuela)*. 1–515.
- Chicaiza, O., Urbano, J., Paredes, F., & Abad, S. (1990). INIAP SHYRI. INIAP.<https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/264/4/iniapscbd204.pdf>
- Chicaiza, O., Rivadeneira, M., Paredes, F., Villacrés, E., & Balseca, R. (1992). INIAP CALICUCHIMA. INIAP.<https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2562/1/iniapscpl126.pdf>
- Chuvieco, E. (2008). *Teledeteccion ambiental: La observación de la tierra desde el espacio*. (3rd ed.). Editorial Ariel Ciencias.

- Cisneros, S., García, É., Montoya, K & Sinde, Í. (2019). Estudio De Las Configuraciones De Puntos De Control Terrestre Para Fotogrametría Con Drone. *Revista Geoespacial*, 16(1), 43. <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v16i1.1278>
- Collins, H. M., Burton, R. A., Topping, D. L., Liao, M. L., Bacic, A., & Fincher, G. B. (2010). Variability in fine structures of noncellulosic cell wall polysaccharides from cereal grains: Potential importance in human health and nutrition. *Cereal Chemistry*, 87(4), 272–282. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-87-4-0272>
- Contreras, S., & López, P. (2009). *Diseño de bloques completos al azar en la investigación agroecológica*.
- Coronel, J., & Jiménez, C. (2011). Guía práctica para los productores de cebada de la Sierra Sur. *Estación Experimental Del Austro*.
- Devore, J. L. (2008). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. (7ma ed.). Cengage Learning Editores.
- Díaz, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. *Universidad Complutense De Madrid, Junio, 77*. http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Elorza, H. (2008). *Estadística para las ciencias sociales, del comportamiento y de la salud*. Cengage Learning Editores, S.A.
- Falconí, E., Monar, C., Rivadeneira, M., Ponce, L., Garófalo, L., & Abad, S. (2010). INIAP
GUARANGA.INIAP.https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2636/1/iniaps_cpl330.pdf
- FAO. (2002). *Los fertilizantes y su uso una*. Food & Agriculture Org.
- FAOSTAT. (2019). Statistical databases. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Fatiha, B., Abdelkader, A., Latifa, H., & Mohamed, E. (2013). Spatio temporal analysis of vegetation by vegetation indices from multi-dates satellite images: application to a semi-arid area in ALGERIA. *Energy Procedia*, 36, 667-675. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.077>
- Fu, B., & Burgher, I. (2015). Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. *Journal of Arid Environments*, 113, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.010>

- García, E., & Flego, F. (2008). Agricultura de precisión. *Tecnología Agropecuaria*, 99–116. <https://www.maquinac.com/wp-content/uploads/2015/07/Agricultura-de-Precision-Universidad-de-Palermo.pdf>
- Gascon, M., Cirach, M., Martínez, D., Dadvand, P., Valentín, A., Plasència, A., & Nieuwenhuijsen, M. J. (2016). Normalized difference vegetation index (NDVI) as a marker of surrounding greenness in epidemiological studies: The case of Barcelona city. *Urban Forestry and Urban Greening*, 19, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.07.001>
- Ghazal, M., Khalil, Y. Al, & Hajjdiab, H. (2016). UAV-based remote sensing for vegetation cover estimation using NDVI imagery and level sets method. *2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, ISSPIT 2015*, 332–337. <https://doi.org/10.1109/ISSPIT.2015.7394354>
- Gil-Docampo, M. L., Arza-García, M., Ortiz-Sanz, J., Martínez-Rodríguez, S., Marcos-Robles, J. L., & Sánchez-Sastre, L. F. (2020). Above-ground biomass estimation of arable crops using UAV-based SfM photogrammetry. *Geocarto International*, 35(7), 687–699. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1552322>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
- 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. *Univerisdad Ncional de La Plata*, 103.
- González, J. A. (2004). Sensores Remotos y Manejo De Información Geográfica. *Técnicas de Muestreo Para Manejadores de Recursos Naturales*, 455–507. <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/429/sensores.pdf>
- Grando, S., & Gomez, H. (Eds.). (2005). Food Barley: Importance, Uses and Local Knowledge. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA).
- Graham, R., & Read, R. E. (1990). *Manual de Fotografía Aérea*. OMEGA.
- Gutiérrez, H., & De la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. (3era ed.). McGraw-Hill.
- Hassan, M. A., Yang, M., Rasheed, A., Yang, G., Reynolds, M., Xia, X., Xiao, Y., & He, Z. (2019). A rapid monitoring of NDVI across the wheat growth cycle for grain yield

- prediction using a multi-spectral UAV platform. *Plant Science*, 282, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.10.022>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, M. (2010). (5ta ed.) *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
- Houghton, R. A. (2005). Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 11(6), 945–958. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x>
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Plaza, A., Guanter, L., Moreno, J., & Martínez, P. (2009). Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: Case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area. *Sensors*, 9(2), 768-793. <https://doi.org/10.3390/s90200768>
- Kumar, D., Rao, S. S., & Sharma, J. R. (2013, September). Radar Vegetation Index as an alternative to NDVI for monitoring of soyabean and cotton. In Proceedings of the XXXIII INCA International Congress. *Indian Cartographer*, Jodhpur, India (pp. 19-21).
- Kim, Y., Jackson, T., Bindlish, R., Lee, H., & Hong, S. (2012). Radar vegetation index for estimating the vegetation water content of rice and soybean. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4), 564–568. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2174772>
- Lan, Y., Zhang, H., Lacey, R., Hoffmann, W. C., & Wu, W. (2009). Development of an Integration Sensor and Instrumentation System for Measuring Crop Conditions. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 0(0), 1–16.
- Lehmann, G. (1975). *Fotogrametría*. Editores técnicos asociados, S.A.
- López-Álvarez, M. A., Hernández-Andrés, J., Romero, J., Campos, J., & Pons, A. (2009). Calibrating the Elements of a Multispectral Imaging System. *Journal of Imaging Science and Technology*, 53(3), 031102. <https://doi.org/10.2352/j.imagingsci.technol.2009.53.3.031102>
- Luque Ordóñez, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Acta*, 17–31.
- MAPIR. (2021). *MAPIR Camera*. [Imagen].

<https://www.mapir.camera/collections/survey3/products/survey3w-camera-red-green-nir-rgn-ndvi>

- Marcos-Robles, J. L., Sánchez, L. F., Gil Docampo, M. de la luz, Ortiz, J., & Martínez, S. (2016). Empleo de la fotogrametría de rango cercano y RPAs para la determinación de biomasa en parcelas agrícolas. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao*, 19, 118–130. <https://doi.org/10.17013/risti.19.118-130>
- Marini, M., Lauric, A., & De Leo, G. (2019). *Evaluación comparativa del desarrollo de cereales de invierno en campañas bajo condiciones hídricas contrastantes. Partido de Bahía Blanca y Cnel. Rosales, 2018 -2019*. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca.
- Marote, M. (2001). Agricultura de precisión. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3), 7–10.
- Martínez, A., & Leyva, A. (2014). *Revisión bibliográfica LA BIOMASA DE LOS CULTIVOS EN EL AGROECOSISTEMA . Review Biomass crops in the agroecosystem. Its benefits agroecological Anirebis Martínez Romero) y Angel Leyva Galán*.
- Mayer, K. F. X., Waugh, R., Langridge, P., Close, T. J., Wise, R. P., Graner, A., Matsumoto, T., Sato, K., Schulman, A., Ariyadasa, R., Schulte, D., Poursarebani, N., Zhou, R., Steuernagel, B., Mascher, M., Scholz, U., Shi, B., Madishetty, K., Svensson, J. T., ... Stein, N. (2012). A physical, genetic and functional sequence assembly of the barley genome. *Nature*, 491(7426), 711–716. <https://doi.org/10.1038/nature11543>
- Moeckel, T., Safari, H., Reddersen, B., Fricke, T., & Wachendorf, M. (2017). Fusion of ultrasonic and spectral sensor data for improving the estimation of biomass in grasslands with heterogeneous sward structure. *Remote Sensing*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/rs9010098>
- Mondragón, M. (2014). Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia. *Movimiento científico*, 8(1), 98-104.
- Moral, I. (2016). Modelos de regresión: Lineal simple y regresión logística. *Revista Seden*, 14, 195–214. <https://www.revistaseden.org>
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. *Centro de Información de Recursos Naturales*, 15. [http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema Índices de vegetación%2C Pedro Muñoz A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetacion%2C%20Pedro%20Muoz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Niu, Y., Zhang, L., Zhang, H., Han, W., & Peng, X. (2019). Estimating above-ground biomass of maize using features derived from UAV-based RGB imagery. *Remote Sensing*, 11(11), 1261.
- Odum, E. P. (1969). The strategy of ecosystem development. *Science*, 164(3877), 262–270. <https://doi.org/10.1126/science.164.3877.262>
- Ordan Sanz, J. A., Melgar Hiraldo, M. D. C., & Rubio Castaño, C. M. (2010). Métodos estadísticos y econométricos en la empresa y para finanzas.
- Pérez, C., & Muñoz, N. (Eds.). (2006). *Teledetección Nociones y Aplicaciones*.
- Possoch, M., Bieker, S., Hoffmeister, D., Bolten, A. A., Schellberg, J., & Bareth, G. (2016). Multi-Temporal crop surface models combined with the rgb vegetation index from UAV-based images for forage monitoring in grassland. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2016-Janua(July), 991–998. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-991-2016>
- Popescu, S. C. (2007). Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. *Biomass and Bioenergy*, 31(9), 646–655. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.06.022>
- Prieto Valiente, Luis; Herranz Tejedor, I. (2010). *Bioestadística sin dificultades matemáticas*.
- Quirós, E. (2014). *Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicadas a la ingeniería civil*. Cáceres, ES. Universidad de Extremadura.
- Rivadeneira, M., Ponce, L., Abad, S., & Coronel, J. (2003). INIAP -Estación Experimental Santa Catalina. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2591/1/iniapscpl208.pdf>
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *Remote Sensing Center*.
- Saavedra, D., Méndez, D., Machadp, L., & Murcia, V. (2020). *Manual de interpretación y aplicación de imágenes multiespectrales en cultivos de importancia agrícola en el norte del Huila* (Issue February). https://www.researchgate.net/publication/339524014_Manual_de_interpretacion_y_aplicacion_de_imagenes_multiespectrales_en_cultivos_de_importancia_agricola_en_el_norte_del_Huila/link/5e5714e8299bf1bdb83e5a0a/download
- Schirrmann, M., Giebel, A., Gleiniger, F., Pflanz, M., Lentschke, J., & Dammer, K. H.

- (2016). Monitoring agronomic parameters of winter wheat crops with low-cost UAV imagery. *Remote Sensing*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/rs8090706>
- Sobrino, J., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliosio, A., López-García, M., Belaid, A., El Kharraz, M., Cuenca, J., & Dempere, L. (2000). *Teledetección*. Universidad de Valencia.
- Solis Santistevan, V. A. (2019). "El nitrógeno como base de la producción agrícola en cultivos de ciclo corto" (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2019).
- Tello, J. (2016). *Identificación y seguimiento con teledetección de la fenología de los cultivos en el polígono de riego de la violada (Huesca)*. Universidad Zaragoza. España
- Tilly, N., Hoffmeister, D., Cao, Q., Huang, S., Lenz-Wiedemann, V., Miao, Y., & Bareth, G. (2014). Multitemporal crop surface models: accurate plant height measurement and biomass estimation with terrestrial laser scanning in paddy rice. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1), 083671.
- Trueba Aja, S. (2017). *Trabajo Fin de Grado Análisis de imágenes multiespectrales aéreas de vegetación*. 78. <http://hdl.handle.net/10902/11979>
- Ullrich, S. (2010). Barley: Production, Improvement, and Uses.
- Verhulst, N., Govaerts, B., Sayre, K. D., Deckers, J., François, I. M., & Dendooven, L. (2009). Using NDVI and soil quality analysis to assess influence of agronomic management on within-plot spatial variability and factors limiting production. *Plant and Soil*, 317(1–2), 41–59. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9787-x>
- Viera, R. (2019) *Propuesta metodológica para la generación de la línea base en la pronta detección de pudrición de cogollo y anillo rojo en palma aceitera mediante tecnología geoespaciales* [Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/21636>
- Villacrés, E. (2008). *INIAP -Estación Experimental Santa Catalina*. <http://181.112.143.123/bitstream/41000/2827/1/iniapsc322est.pdf>
- Yar, P. (2013). Determinación del rendimiento de grano, en la reintroducción de cuatro variedades de cebada (*Hordeum Vulgare L.*) mediante la aplicación de la abonadura orgánica en la zona de pimampiro provincia de Imbabura. Universidad técnica de Babahoyo

Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengber, A. E., & Tucker III, C. J. (2016). Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Asses Land Degradation at Multiple Scales. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8>

Anexos