

UCUENCA

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Carrera de Ingeniería Agronómica

Análisis de la respuesta espectral del cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) a la aplicación de fertilizante nitrogenado evaluado con el índice de vegetación NDVI

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Agrónomo

Autor:

José Ismael Robles Vargas

CI: 0850256520

Correo electrónico: isma_sagitario@hotmail.es

Director:

Ing. Manuel Alfonso Palacios Valdiviezo Mgt

CI: 0300830981

Cuenca-Ecuador

28 de noviembre del 2022

RESUMEN:

El cultivo de cebada *Hordeum vulgare* L. es uno de los principales cereales a nivel mundial, nacional y regional, su importancia se debe a su gran poder de adaptación ecológica, su valor nutricional y extracción de malta para la elaboración de cerveza. En la producción de cereales el nitrógeno es el elemento más importante porque está presente en diferentes funciones fisiológicas de la planta. Generalmente, y especialmente en nuestro medio, la fertilización de nitrógeno en cebada es deficiente, o se hace mal uso de la misma, resultando de poca eficiencia para el cultivo y de esta manera aumentando la tasa de contaminación ambiental inducida por fertilizantes nitrogenados. El presente estudio realizó la aplicación del índice de vegetación NDVI en cebada evaluando su respuesta espectral o estado nutricional sometido a diferentes dosis de fertilización, con el propósito de establecer a qué dosificación el cultivo brinda una respuesta espectral idónea y medible con este método. El experimento se ejecutó en la granja de Iruquis de la Universidad de Cuenca, se realizó un diseño de bloques completos distribuidos al azar (D.B.C.A) con 4 repeticiones donde se aplicó 4 tratamientos de fertilizante nitrogenado, en este caso Urea al 46%. (T1 = 0 kg N/ha de CH₄N₂O); (T2 = 20 kg N/ha de CH₄N₂O); (T3 = 60 kg N/ha de CH₄N₂O); (T4 = 80 kg N/ha de CH₄N₂O). La aplicación del fertilizante fue fraccionada, una mitad al inicio de la siembra (0 días después de la siembra) y la otra mitad en el estado fenológico de macollamiento (40 dds). La toma de imágenes se realizó en 3 etapas fenológicas: macollamiento (51 dds), espiga (86 dds) y madurez (112 dds). Los resultados mostraron diferencias significativas para la fase fenológica de espiga, pero no se encontró diferencias significativas para las fases fenológicas de macollamiento o madurez. Este estudio demostró que mediante la interpretación del índice NDVI es posible conocer el comportamiento espectral del cultivo sometido a diferentes dosificaciones de nitrógeno.

Palabras claves: *Hordeum vulgare* L, Respuesta espectral, Índice de vegetación normalizado (NDVI), Fertilizante nitrogenado, Urea.

ABSTRACT:

The barley *Hordeum vulgare* L. is one of the main cereals crops worldwide, nationally and regionally, its importance is due to its great capacity of ecological adaptation, its nutritional value and malt extraction for brewing. In cereal production, nitrogen is the most important element because it is present in different physiological functions of the plant. Generally, and especially in our environment, nitrogen fertilization in barley is deficient, or it is misused, resulting in low efficiency for the crop and thus increasing the rate of environmental pollution induced by nitrogenous fertilizers. The present study applied the NDVI vegetation index in barley, evaluating its spectral response or nutritional status subjected to different doses of fertilization, with the purpose of establishing at what dosage the crop provides an ideal and measurable spectral response with this method. The experiment was carried out at the Irquis farm of the University of Cuenca, a randomized complete block design (D.B.C.A) with four repetitions where four nitrogenous fertilizer treatments was applied: 46% Urea. (T1 = 0 kg N/ha of CH₄N₂O); (T2 = 20 kg N/ha of CH₄N₂O); (T3 = 60 kg N/ha of CH₄N₂O); (T4 = 80 kg N/ha of CH₄N₂O). Fertilizer application was divided, one half at the beginning of sowing (0 days after sowing) and the other half at the tillering phenological stage (40 dap). Images were taken in three phenological stages: tillering (51 dap), spike (86 dap) and maturity (112 dap). The results showed significant differences for the spike phenological phase, but no significant differences were found for the tillering or maturity phenological phases. This study showed that by interpreting the NDVI index it is possible to know the spectral behavior of the crop subjected to different dosages of nitrogen.

Keywords: *Hordeum vulgare* L, Spectral response, Normalized Vegetation Index (NDVI), Nitrogen fertilizer, Urea.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN:.....	2
ABSTRACT:	3
1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivo General.....	17
2.2. Objetivos específicos	17
3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	17
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	18
4.1. El cultivo de <i>Hordeum vulgare</i> L. (cebada).....	18
4.1.1. Fertilización.....	18
4.1.2. Recomendaciones de fertilización	19
4.2. Agricultura de precisión.....	20
4.2.1. Aplicaciones de la agricultura de precisión.....	20
4.3. Vehículos aéreos no tripulados (UAS/RPAS).....	21
4.4. Sensor multiespectral	22
4.5. Índices de vegetación.....	23
4.6. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	23
4.6.1. Clasificación de los valores de NDVI.....	24
4.6.2. Calibrador radiométrico	25
4.7. Vuelo y captura de imágenes.....	25
4.8. Puntos de control terrestre.....	27
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
5.1. Área de estudio	28
5.1.1. Características del sitio experimental	28

5.1.2.	Características edáficas	31
5.2.	Materiales	31
5.3.	Características del campo experimental.....	32
5.4.	Diseño estadístico	33
5.5.	Metodología.....	34
5.5.1.	Preparación del terreno	34
5.5.2.	Establecimiento del cultivo	34
5.5.3.	Fertilización.....	34
5.5.4.	Riego por aspersión	35
5.5.5.	Planificación y determinación de parámetros de vuelo	36
5.5.6.	Establecimiento de puntos de control con GPS GNSS.....	37
5.5.7.	Vuelo y captura de imágenes multiespectrales.....	37
5.5.8.	Montaje, encendido, configuración y calibración de la cámara Parrot Sequoia 38	
5.5.9.	Procesamiento de imágenes individuales.....	41
5.5.10.	Generación de mapas (ortoimagen)	41
5.5.11.	Procesamiento de imágenes multiespectrales	43
5.5.12.	Obtención de valores de NDVI.....	44
5.5.13.	Categorización de imágenes	45
6.	RESULTADOS	47
6.1.	Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del cultivo para las 3 fases fenológicas.....	47
6.1.1.	Evaluación del NDVI para la fase fenológica de macollamiento (51 dds)...	47
6.1.2.	Evaluación del NDVI para la fase fenológica de espigamiento (86 dds).	48
6.1.3.	Evaluación del NDVI para la fase fenológica de madurez (112 dds).....	49

6.1.4. Comparación de los valores del índice NDVI en los diferentes estados fenológicos del cultivo.....	50
6.2. Análisis de la categorización del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para las 3 fases fenológicas.....	50
6.2.1. Evaluación del NDVI categorizado para la fase fenológica de macollamiento (51 dds).51	
6.2.2. Evaluación del NDVI categorizado para la fase fenológica de espiga (86 dds) y madurez (112 dds).....	52
7. DISCUSIÓN.....	53
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXOS.....	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Recomendaciones de fertilización para el cultivo de cebada.....	20
Tabla 3 Materiales y equipos.....	31
Tabla 4 Características del campo experimental.	32
Tabla 5 Tratamientos, etapas y dosis de fertilizante aplicado en las diferentes unidades experimentales de acuerdo al análisis de suelo.	35
Tabla 6 Parámetros de vuelo dados por el software mission planner.	36
Tabla 7 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los valores de NDVI entre tratamientos.	47
Tabla 8 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los valores de NDVI entre tratamientos.	48
Tabla 9 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los valores de NDVI entre tratamientos.	49

Tabla 10 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los porcentajes del NDVI categorizado entre tratamientos para la fase fenológica de macollamiento.....	51
Tabla 11 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los porcentajes del NDVI categorizado entre tratamientos, para la fase fenológica de espiga.	52
Tabla 12 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los porcentajes del NDVI categorizado entre tratamientos para la fase fenológica de madurez del cultivo.	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama del proceso espectral para la creación del mapa y el índice NDVI en Agisoft Metashape	42
Figura 3 Curva de normalidad para la fase fenológica de espigamiento (86 dds), obteniendo un valor de $p > 0.005$ ($p = 0.9009$).	47
Figura 4 Promedio de las medias del índice NDVI para la fase fenológica de macollamiento.	48
Figura 5 Promedio de las medias del índice NDVI para la fase fenológica de madurez....	49
Figura 6 Variación de los valores de NDVI en los estados fenológicos de macollo (51 dds), espiga (86 dds) y madurez (112 dds)	50
Figura 7 Curva de normalidad de la categorización del índice NDVI para la fase fenológica de macollamiento (51 dds), obteniendo un valor de $p > 0.005$ ($p = 0.5276$).	50
Figura 8 NDVI categorizado que muestra el porcentaje de píxeles de la vegetación enferma y sana.....	51

LISTA DE IMAGENES

Imagen 1 Segmento vuelo-Mavic Pro.....	22
Imagen 2 Espectro típico de reflectancia de una planta saludable y otra estresada.....	24
Imagen 3 Clasificación de los valores del índice NDVI en categorías.	25
Imagen 4 Calibrador radiométrico, imagen capturada para la corrección en la banda verde.	25
Imagen 5 Punto de control terrestre fijo.....	27
Imagen 6 Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	28

Imagen 7 Radiación Solar presente en el área de estudio.	29
Imagen 8 Precipitación presente en el área de estudio.....	29
Imagen 9 Humedad relativa del área de estudio.	30
Imagen 10. Temperatura ambiental de la zona de estudio.	30
Imagen 11 Perfil del suelo.	31
Imagen 12 Distribución espacial en campo de la parcela experimental.	33
Imagen 13 Aplicación de riego el día de la siembra (izquierda) y, riego en la fase fenológica de macollamiento 56 dds (derecha).	36
Imagen 14 Calibración y colocación de GNSS estático (izquierda) y toma de puntos con el GNSS relativo o móvil (derecha).....	37
Imagen 15 Colocación de marcas de fotocontrol de plástico con mosaico de colores.	38
Imagen 16 Montaje de cámara y sensor de luz al dron Mavic Pro	39
Imagen 17 Configuración mediante la red wifi emitida por la cámara multiespectral.	39
Imagen 18 Calibración radiométrica externa de la luz en tiempo real.....	40
Imagen 19 Georreferenciación de las imágenes, los banderines de color verde significa que el operador ha colocado el punto de control de manera manual y este se encuentra georreferenciado según el código de cada control.	41
Imagen 20 Resultado final del ortomosaico realizado.	43
Imagen 21 Imagen multiespectral usada para la obtención de datos del índice NDVI.	43
Imagen 22 Imagen multiespectral más puntos georreferenciados de las unidades experimentales	44
Imagen 23 Cortes realizados a las diferentes unidades experimentales a muestrear.	44
Imagen 24 Ventana de información de donde sacamos los datos de cada una de las unidades experimentales muestreadas para la creación de nuestra base de datos.....	45
Imagen 25 Reclasificación de los valores NDVI en categorías.....	45
Imagen 26 Valores de cada una de las categorías agrupadas por los valores de los pixeles.	46
Imagen 27 Archivo de extensión HTML, que nos propinó la información del número de pixeles agrupado por categoría.	46

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Formula para cálculo de índice NDVI.	24
---	----

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Delimitación y preparación del espacio físico utilizado para llevar acabo la experimentación.	65
Anexo 2 Toma de muestra de suelo y siembra general del cultivo con tractor.....	65
Anexo 3 Cuantificación de fertilizante a emplear por tratamiento y aplicación de fertilizante.	65
Anexo 4 Análisis de suelo de la parcela experimental.	66
Anexo 5 Plan de fertilización nitrogenada basado en análisis de suelo por tratamiento. ...	67
Anexo 6 Parámetros de vuelo dado por el software mission planner	67

ABREVIATURAS Y SIMBOLOGIA

GSD: Ground simple distance (distancia de muestreo del suelo)

DDS: Días después de la siembra

Kg N/ha: Kilogramos de nitrógeno por hectárea

UAS/RPAS: Vehículos aéreos no tripulados

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

José Ismael Robles Vargas en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de la respuesta espectral del cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) a la aplicación de fertilizante nitrogenado evaluado con el índice de vegetación NDVI", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 28 de noviembre del 2022



José Ismael Robles Vargas

C.I: 0850256520

Cláusula de Propiedad Intelectual

José Ismael Robles Vargas, autor del trabajo de titulación "Análisis de la respuesta espectral del cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) a la aplicación de fertilizante nitrogenado evaluado con el índice de vegetación NDVI", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 28 de noviembre del 2022



José Ismael Robles Vargas

C.I: 0850256520

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por ser el quien me brindo la sabiduría para culminar con éxito este trabajo.

Agradecer también al Ing. Alfonso Palacios, mi tutor de tesis quien con su experiencia, conocimiento, experiencia y paciencia logró que el trabajo sea positivo.

De igual manera agradecer al Ing. Mateo López quien fue el principal apoyo para lograr sacar adelante este trabajo de tesis, con toda su experiencia y sabiduría en la ciencia de la teledetección. A mis docentes, trabajadores y amigos de la facultada de Ciencias Agropecuarias que supieron guiarme para poder hacer realidad este trabajo.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por brindarme salud y sabiduría en guiarme y escalar un escalón más en mi vida. A mis padres Domingo Robles y Matilde Vargas, por siempre apoyarme y no desistir en el apoyo brindado siempre por ellos. A mis hermanos y sobrinas que siempre me alentaron a salir adelante, y, por último, pero no menos importante a mis amigos que siempre estuvieron ahí para brindarme la mano y ese apoyo incondicional, todo esto es gracias a ustedes. Estoy eternamente agradecido.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de *Hordeum vulgare* L. (cebada) es el cuarto cereal más importante a nivel mundial después del trigo, maíz y arroz. La razón de su importancia se debe a su amplia adaptación ecológica y a su diversidad de aplicación (FAOSTAT, 2007), debido a que se ajusta bien a condiciones marginales de humedad, suelo y es tolerante a sequías (Sun & Gong, 2010). Es el cereal de mayor valor en la alimentación de la población de la Sierra Sur (Cañar, Azuay y Loja), superando áreas ocupadas por cultivos básicos como papa (47.494 ha) y trigo (21.945 ha) (Rivadeneira, 1995).

El cultivo de cebada en el Ecuador se encuentra en las zonas altas de la sierra ecuatoriana, que se caracterizan por tener suelos erosionados, con baja fertilidad y problemas de acidez, provocando directamente una disminución en los rendimientos de los diferentes cultivos (Rivadeneira, 1995). En estas áreas este cereal es la principal fuente de carbohidratos especialmente para poblaciones indígenas, así mismo el 70% de agricultores siembran cebada en superficies inferiores a una hectárea, y es utilizado para el autoconsumo (Garófalo et al., 2010). En el país el 40% de la producción se usa para producir cerveza, mientras que los excedentes se comercializan en mercados locales (Garófalo et al., 2010). Entre los usos más importantes están la alimentación animal mediante forraje o grano, alimentación humana y extracción de malta para elaborar cerveza (Sun & Gong, 2010).

En la producción de cereales, el nitrógeno es el elemento más limitante (Arnall et al., 2009), porque contribuye a la acumulación de biomasa, forma la molécula de clorofila y participa del balance nutricional de la planta al facilitar la absorción y asimilación de otros nutrientes como el “K+” (Lopez et al., 2009). Una adecuada disponibilidad de nitrógeno puede incrementar no solo la calidad del grano, en especial el contenido de proteína, sino también el nivel de producción hasta un 45% (Ferraris et al., 2008; Blackshaw et al., 2011; Reussi Calvo et al., 2006). En Ecuador la fertilización en cebada es deficiente porque muchos agricultores no aplican fertilizante, mientras que otros lo aplican sin hacer un manejo adecuado del suelo y el cultivo, por lo que se exceden en los requerimientos de fertilización, resultando de baja eficiencia el uso del fertilizante e incrementa la contaminación ambiental (Brikmam, 1999). El estudio de Moreno et al (2013) señala “la excesiva fertilización

nitrogenada está asociada con la contaminación de aguas por nitrato y con la emisión a la atmósfera de amoníaco y óxidos de nitrógeno (de potente efecto invernadero)”.

Actualmente disponemos de sensores remotos que permiten monitorear la nutrición nitrogenada y el estado general de los cultivos. Estos sensores constituyen una herramienta de diagnóstico muy interesante, aunque no reemplazan los métodos tradicionales (N-suelo actual y potencial). “Podemos considerar a los sensores como una herramienta más, que nos permite evaluar el estado nutricional del cultivo” (Sabando Lopez & Ross, 2015). En esta línea, se busca estimar la respuesta espectral del cultivo de cebada, mediante la utilización de imágenes multiespectrales e interpretación del índice NDVI como herramienta que permita visualizar el estado nutricional de los cultivos sometidos a fertilización nitrogenada, obteniendo de este modo información de manera rápida, precisa y eficiente en el cultivo evaluado, permitiendo a los agricultores, con un gasto mínimo de insumos, alcanzar una alta producción (Saxena & Armstrong, 2014). En el estudio realizado por Rendon & Sedeghian (2018), donde evalúan la aplicación de índices espectrales para identificar necesidades de fertilización nitrogenada en café, mencionan que “el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) sirve para evaluar el estado de vigor de los cultivos, su sanidad y nutrición” además mencionan también que la espectrometría es una herramienta alternativa para determinar el contenido foliar de elementos como el N, es a través de métodos indirectos (no destructivos) basados en el uso de técnicas de agricultura de precisión, por medio de sensores portátiles con los que se evalúan índices espectrales. Por otro lado, Boero et al (2018), en su investigación basada en estimar el estado nutricional del cultivo de cebada cervecera, sostienen que “el uso de índices espectrales surge como una alternativa rápida y económica para diagnosticar la necesidad de fertilizar durante el ciclo del cultivo y de esta manera predecir el rendimiento y el contenido proteico a cosechar, empleando índices espectrales”. Huber et al (2008), señalan que “la espectrometría es una herramienta que, debido a su eficiencia en cuanto a costos en una agricultura a gran escala, ofrece resultados inmediatos y no requiere destruir la muestra que se está analizando”.

Considerando lo citado el siguiente trabajo plantea la implementación de índices espectrales como alternativa viable para el análisis de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de cebada, permitiendo de esta manera diagnosticar el estado nutricional del cultivo y así

maximizar su producción y consecuentemente la disminución del daño medio ambiental causado por el excesivo y mal empleo de fertilizantes nitrogenados. Con esto, se brinda una solución en línea con los objetivos perseguidos en el Plan Nacional para el Buen Vivir en su objetivo 1, meta 1.4, literal “O” nos habla acerca de fomentar asistencia técnica, capacitación y procesos adecuados de transferencia de ciencia, tecnología y conocimientos ancestrales, para la innovación y el mejoramiento de los procesos productivos, con la activa participación de los diversos actores incluyendo a las universidades e institutos técnicos. Todo esto promovido en la zona de planificación 6 (Azuay), dentro de sus planes prioritarios que citan: Impulsar la investigación científica y tecnológica, y garantizar a la población la auto suficiencia y acceso permanente a alimentos sanos y culturalmente apropiados (SENPLADES, 2009).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Determinar la respuesta espectral del cultivo de cebada sometido a fertilización nitrogenada utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI.

2.2. Objetivos específicos

- a) Aplicar 4 dosis diferentes de fertilizante nitrogenado en el estado fenológico de macollamiento.
- b) Analizar e interpretar el índice de vegetación (NDVI) en las diferentes dosis de fertilización y estados fenológicos del cultivo.

3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- a) ¿El empleo del índice de vegetación (NDVI) representa una alternativa viable para el diagnóstico del estado nutricional en el cultivo de cebada?
- b) ¿Los resultados obtenidos se ven directamente influenciados por la fase fenológica del cultivo, la cantidad de fertilizante empleado y variables físicas de la zona?

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1. El cultivo de *Hordeum vulgare* L. (cebada)

Tradicionalmente la cebada es un cultivo de secano adaptado a zonas altas de la sierra en comparación al maíz y trigo, debido a su ciclo vegetativo más corto que el de las otras dos especies y está adaptado a suelos con bajos niveles de fertilidad. La cebada es una fuente importante de calorías en los Andes en general, complementándose con otros cultivos nativos como la quinua y el amaranto, que poseen un contenido de proteína alto y bien balanceado, pero que generalmente son menos rendidores que la cebada y requieren más mano de obra (Vivar & NcNab, 2001).

La elección del suelo es uno de los principales requisitos para el cultivo de la cebada tanto en sus características físicas como químicas. Para la cebada se requiere un pH mínimo de 5.8 y un óptimo de 6.0. En cuanto a la textura se prefieren suelos francos (limoso, arcilloso y arenoso), profundos y de buen drenaje (Agroinversiones, 2010). Garófalo et al., (2010) mencionan que si la siembra es a voleo se emplea la cantidad de 135 kg/ha (3qq/ha) y si la siembra es a maquina disminuye a 110 kg/ha (2.5qq/ha).

4.1.1. Fertilización

Las dosis de fertilización deben ser basadas en un análisis de suelo; sin embargo, cuando el agricultor no dispone de éste, la fertilización puede ser basada en la extracción de nutrientes que el cultivo de cebada toma del suelo. El cultivo de cebada requiere 60 kg de Nitrógeno (N), 26 kg de Fósforo (P), 35 kg de Potasio (K) y 20 kg de Azufre (S) por hectárea, para un rendimiento de 3 a 4 toneladas de grano por hectárea (Garófalo et al, 2010).

Según Agroinversiones (2010) la extracción de nutrientes por tonelada de grano de cebada producida es de 26 kg de N, 9 kg de P, 21 kg de K y 3 kg de Mg. El P y K son más eficientes cuando se aplican al momento de la siembra. El N se aplica de 20 a 30 kg N ha en el momento de la siembra junto con el P y K. El resto de N se aplica al macollamiento (30-45 días después de la siembra) en una o dos aplicaciones (PLASTER, 2000 & Garófalo et al., 2010).

El nitrógeno es el componente fundamental de todas las moléculas orgánicas involucradas en los procesos de crecimiento y desarrollo vegetal: aminoácidos, ácidos nucleicos, clorofila, citocromos, coenzimas, hormonas y otros compuestos nitrogenados. Por lo tanto, participa activamente en los principales procesos metabólicos: fotosíntesis, respiración y la síntesis proteica, las plantas requieren de grandes cantidades de nitrógeno para crecer normalmente (Garófalo A. , 2012).

En los cultivos de cereales la fertilización nitrogenada es una herramienta que permite alcanzar rendimientos elevados e incrementar su contenido proteico.

El nitrógeno causa en las plantas los siguientes efectos:

- Acentúa el color verde del follaje.
- Confiere succulencia a los tejidos.
- Favorece el desarrollo exuberante del follaje.
- Puede aumentar la susceptibilidad a plagas y enfermedades.
- Aumenta el contenido de proteína.
- El exceso de N propicia el volcamiento o acame.
- Alarga el ciclo vegetativo de los cultivos.

Retrasa la maduración de frutos (Garófalo A. , 2012).

4.1.2. Recomendaciones de fertilización

Para Garófalo (2012), quien cita la información de (INIAP, Recomendaciones de fertilización, 2009), la recomendación de fertilización depende del resultado de análisis de suelo. Si no se posee un análisis de suelo se recomienda aplicar una fertilización media por hectárea de 34 kg de N, 22.7 kg de P, 9.1 de K, 11 kg de S y 3.3 kg de MgO; como por ejemplo dos sacos de fertilizante compuesto 11-52-00 más un saco de Sulpomag (9 kg de K, 5 Mg y 11 S) a la siembra y un saco de urea en el macollamiento (Garófalo et al., 2010).

Fertilidad	N	P	K	S
	Kg ha			
Baja	80-100	26-39	33-50	20-30
Media	60-80	17-26	25-33	10-20

Alta

20-60

0-17

17-25

0-10

Tabla 1 Recomendaciones de fertilización para el cultivo de cebada.
Fuente: (INIAP, Recomendaciones de fertilización, 2009)

Al momento de la siembra se debe aplicar al voleo todo el P, K, S y la mitad de N. La otra mitad de N al voleo al macollamiento de la cebada.

4.2. Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es el manejo diferenciado de los cultivos utilizando para ello diferentes herramientas tecnológicas (GPS, sensores planta-clima-suelo e imágenes multiespectrales) provenientes tanto de satélites como de los vehículos aéreos no tripulados (UAS/RPAS), a partir de este manejo diferenciado del cultivo podremos detectar la variabilidad que tiene una determinada explotación agrícola, así como realizar una gestión integral de dicha explotación (Díaz García, 2015).

4.2.1. Aplicaciones de la agricultura de precisión.

- a) **Detección del estado hídrico de las plantas**, utilizando imágenes térmicas de elevada resolución espacial, obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado, con el propósito de obtener información que nos permita un mejor aprovechamiento del agua. El estrés hídrico en los cultivos provoca el cierre de los estomas, reduciendo la transpiración y aumentando la temperatura de las hojas, pudiéndose monitorizar a partir de sensores térmicos.
- b) **Detección de stress nutricional en cultivos**, para posteriormente hacer un uso óptimo de fertilizantes sólo en las zonas en las que es necesaria su aplicación, y reduciéndose los costos de estos. A partir de la determinación del contenido de clorofila de las plantas se obtiene la concentración de nitrógeno de la hoja, ya que guardan relación, al detectar esta falta de nutrientes en los cultivos nos permitirá realizar un uso óptimo de fertilizantes, utilizando estos solo en las zonas en las que son necesarios.
- c) **Detección temprana de enfermedades y plagas en cultivos**, a partir de imágenes multiespectrales, detectando así el stress en la vegetación producido por la presencia de plagas y enfermedades, generándose mapas diversos, que nos permiten detectar procesos en los cultivos en forma focalizada, así como dimensionar el problema y

evaluarlo en forma puntual. Permitirá aumentar los beneficios económicos de los agricultores, evitará la aplicación innecesaria de compuestos fitosanitarios (herbicidas y pesticidas).

- d) **Controles en cultivos**, mediante monitorización del estado de los cultivos durante su ciclo fenológico, a partir de imágenes multiespectrales y de la captura de los datos de campo con equipos colectores de datos-PDA con GPS.
- e) **Información agrometeorológica en tiempo real**. Generando mapas con la distribución de las principales variables meteorológicas, como temperatura, humedad, precipitación, insolación, etc. (Díaz García, 2015)

4.3. Vehículos aéreos no tripulados (UAS/RPAS)

UAS/RPAS es una aeronave sin tripulación a bordo, con unas características técnicas excepcionales para realizar vuelos, controlada remotamente por un piloto mediante un sistema de control. Estos tienen dos segmentos claramente definidos:

- Segmento de Vuelo: Formado por el Vehículo Aéreo y los sistemas de Recuperación (aterrizaje sobre ruedas o patines, red, cable, paracaídas.).
- Segmento de Tierra: Formado por la Estación de Control (está en tierra, recibe la información enviada por los drones y a su vez les dan órdenes) y los sistemas Lanzador (pueden ser hidráulicos, neumáticos, etc.) (Díaz García, 2015).

La observación aérea mediante UAS/RPAS conlleva la formación de cuatro conjuntos, necesarios para hacer posible la recogida de datos, repartidos entre la plataforma aérea y la estación terrestre.

- Plataforma de Vuelo: el propio vehículo y su carga, es decir, la cámara fotográfica y otros sensores.
- Sistema de Control de Vuelo: Formado por receptores GPS+EGNOS integrados en la plataforma de vuelo. Georreferencia la información obtenida y controla el seguimiento del vehículo aéreo.
- Sistema de Lanzamiento y Recuperación: controla el despegue y el aterrizaje.
- Sistema de Comunicaciones: a través de la radio, comunica la estación de control con el UAS, transmite la información adquirida durante el vuelo.



Imagen 1 Segmento vuelo-Mavic Pro.

De manera general, existen dos tipos de plataforma de UAS/RPAS, de ala fija y de ala rotatoria. En función del objetivo buscado, será necesario el empleo de una plataforma u otra. Los condicionantes principales para seleccionar la plataforma serán la superficie a estudiar, la resolución espacial requerida y las condiciones para el despegue y el aterrizaje en la zona (Díaz García, 2015)

4.4. Sensor multiespectral

Existen sensores multiespectrales miniaturizados para embarcar en vehículos aéreos no tripulados. Estos sensores pueden llegar a tomar valores de hasta 6 bandas espectrales, siendo posible seleccionar diferentes bandas mediante el empleo de filtros. Por regla general, estos sensores están diseñados para el estudio de parámetros relativos a la vegetación, por lo que las bandas están seleccionadas en los rangos del verde, rojo e infrarrojo cercano, donde la vegetación presenta su mayor respuesta de absorbancia y reflectancia. El proceso para la toma de las imágenes es similar al vuelo fotogramétrico, en cuanto a los aspectos relativos a la posterior corrección geométrica de las imágenes y generación de mosaicos. Además, el tratamiento de estas imágenes no solo precisa de corrección geométrica, sino que son necesarias operaciones de calibración radiométrica, así como las correcciones atmosféricas necesarias para la obtención de datos validados de reflectancia y temperatura de superficie (Díaz García, 2015).

4.5. Índices de vegetación

Los sistemas satelitales de observación de la Tierra, LANDSAT, SPOT y NOAA entre otros, ofrecen imágenes multitemporales que son usadas ampliamente para evaluar y monitorear el estado de la vegetación, en los niveles global, regional, nacional y local. Al hablar de índices nos referimos a un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena. Un Índice de Vegetación, puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Muñoz, 2013).

4.6. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta. Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana muestra un claro contraste entre el espectro del visible, especialmente la banda roja, y el Infrarrojo Cercano (NIR) (Díaz García, 2015).

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado, es el más conocido de todos, y es el más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental es su sencillez de cálculo y el disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y $+1$), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes (Muñoz, 2013). Para evaluar el estado de vigor de los cultivos, su sanidad y nutrición se ha utilizado el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) cuyo valor resulta al medir la reflectancia de la radiación en el espectro del rojo ($650 \pm 10\text{nm}$) y el infrarrojo cercano ($770 \pm 15\text{nm}$) (Samborski , Tremblay , & Fallon, 2009). Una planta sana, con mucha clorofila y una buena estructura celular, absorbe activamente la luz roja y refleja el infrarrojo cercano (NIR). Y sucede exactamente lo contrario con una planta enferma o estresada, absorbe más luz roja en lugar de reflejarla y disminuye el reflejo del infrarrojo cercano (Toribio, Curso Teledetección, 2019)

Los resultados del cálculo del NDVI varían de -1 a 1 . Los valores negativos corresponden a áreas con superficies de agua, estructuras artificiales, rocas, nubes, nieve; el

suelo desnudo generalmente cae dentro del rango de 0.1 a 0.2; y las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0.2 y 1. El dosel de vegetación sano y denso debería estar por encima de 0.5, y la vegetación dispersa probablemente caerá dentro de 0.2 a 0.5. Sin embargo, es solo una regla general y siempre debe tener en cuenta la temporada, el tipo de planta y las peculiaridades regionales para saber exactamente qué significan los valores de NDVI. (Toribio, Cursos Teledetección , 2019).

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

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

Ecuación 1 Formula para cálculo de índice NDVI.
Fuente: (Díaz García, 2015).

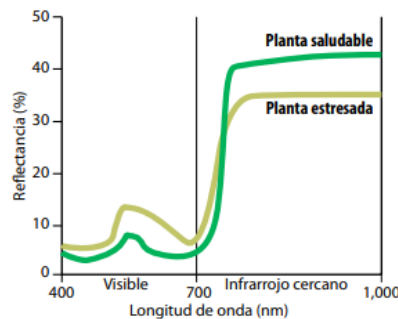


Imagen 2 Espectro típico de reflectancia de una planta saludable y otra estresada.
Fuente: (Verhulst, Govaerts, & Fuentes Ponce, 2010).

4.6.1. Clasificación de los valores de NDVI

En la mayoría de los casos, los valores de NDVI entre 0.2 y 0.4 corresponden a áreas con vegetación escasa; la vegetación moderada tiende a variar entre 0.4 y 0.6; cualquier cosa por encima de 0.6 indica la mayor densidad posible de hojas verdes (Toribio, Cursos Teledetección , 2019). En el estudio realizado por Amanollahi, Ramli, & Mohammad, (2012) titulado “Evaluación de la temperatura de la superficie terrestre en una zona residencial semiárida de Teherán en Irán, donde usaron imágenes Landsat” se tomaron 4 criterios de clasificación del índice NDVI agrupados en: bueno (> 0.10), moderado ($0.01 - 0.10$), débil ($0 - 0.01$) y sin vegetación (< 0). También se tomó en cuenta el criterio de clasificación de Marwaha Kraetzig (2020) en donde menciona que los valores entre -1 y 0 indican plantas

muertas u objetos inorgánicos como piedras, caminos y casas. Los valores de NDVI para plantas vivas oscilan entre 0 y 1, siendo 1 el más saludable y 0 el menos saludable. Su criterio de clasificación fue de cuatro criterios como lo muestra la imagen 3.

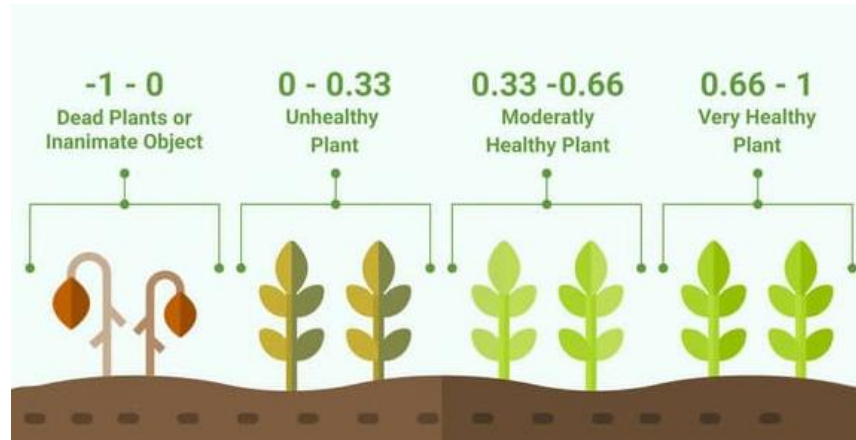


Imagen 3 Clasificación de los valores del índice NDVI en categorías.
Fuente: (Marwaha Kraetzig, 2020)

4.6.2. Calibrador radiométrico

La cámara Sequoia cuenta con un panel para realizar la calibración radiométrica de la misma. Esta calibración garantiza valores de reflectancia más precisos, las imágenes de un panel de reflectancia calibrado deben capturarse directamente sobre el panel inmediatamente antes e inmediatamente después de cada vuelo (Vargas, 2019).

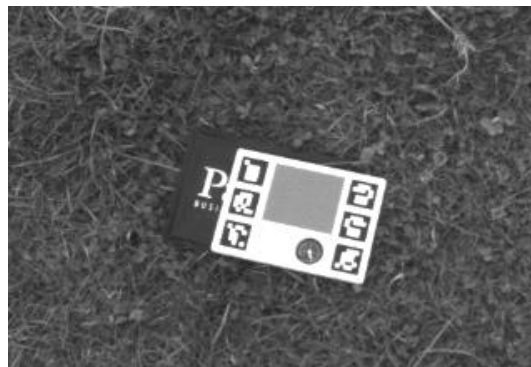


Imagen 4 Calibrador radiométrico, imagen capturada para la corrección en la banda verde.

4.7. Vuelo y captura de imágenes

Es necesario tener en cuenta el objetivo que se persigue y el cultivo en que se trabaja, ya que esto influye sobre la altura a la que se volará y a su vez ésta determina la resolución

espacial de las imágenes, el número de imágenes necesarias para cubrir el cultivo y la duración del vuelo, aspecto muy importante para evitar problemas con la autonomía del vehículo (Torrez et al., 2013).

Si se busca la detección de plantas individuales en cultivos de hilera estrecha como el trigo, es necesario trabajar con resoluciones espaciales de en torno a 1 cm, lo que obliga a volar a una altura de unos 30 m con la cámara Olympus. En cambio, si se requiere mapear rodales de malas hierbas en cultivos en hilera ancha como maíz o girasol, se puede trabajar con resoluciones de unos 5 cm, que se consigue volando a unos 100 m con la cámara multiespectral y a 130 m con la convencional (Díaz García, 2015). En el estudio realizado por Guitierrez et al., (2018), en caña de azúcar donde se evaluaron dos programas: Agisoft Photoscan y Pix4D, generándose los ortomosaicos 3D y mapas de índices NDVI evaluando su facilidad de uso, tiempo de procesamiento, calidad visual del producto y las condiciones de vuelo del VANT, recalcan que para un adecuado procesamiento de las imágenes recolectadas con la cámara multiespectral Parrot Sequoia, realizaron tres vuelos a diferentes alturas, 40 metros (vuelo I), 80 metros (vuelo II) y 120 metros (vuelo III), todos a una velocidad de 6 m/s; los resultados presentados en dicho trabajo consideran a esta última altura de vuelo como la mejor ya que arrojó buenos resultados de resolución y permitió mapear un área mucho mayor. El tamaño del pixel del suelo (GSD) de las ortofotos realizadas fue de 3 cm/pixel, 7 cm/pixel y 11 cm/pixel para el sensor multiespectral donde concluyen que la elaboración de los ortomosaicos multiespectrales se alcanzaron buenos resultados para todas las alturas de vuelo; corroborándose que el valor de la cámara Parrot Sequoia es fundamental para la captura de imágenes multiespectrales, de esta manera, los aviones no tripulados representan una excelente herramienta por la facilidad de montar cámaras multiespectrales y obtener imágenes con una resolución de 11 cm/pixel, volando a 120 metros de altura, las cuales permiten identificar problemas y tomar medidas en áreas específicas de los cultivos que se encuentran enfermos. Con ellos se pueden hacer análisis y censos puntuales de alta precisión, con fotografías de 5.0 cm/pixel a 100.0 m lo que puede disminuir el tiempo y trabajo no solo en zonas de difícil acceso, sino también en grandes extensiones.

4.8. Puntos de control terrestre

Se define a un punto de control como un sitio físico en la tierra del cual se conoce su verdadera posición respecto a un sistema de coordenadas y se puede utilizar como guía. Generalmente estos puntos se establecen con la finalidad de ofrecer información de gran utilidad en los procesos de georreferenciar objetos espaciales y/o fenómenos de interés de acuerdo a las necesidades o naturaleza específica de cada proyecto. Para tener un mayor control en la corrección plani-altimétrica de las imágenes, es necesario el establecimiento de cinco (05) puntos, distribuidos en las esquinas y uno en el centro, esto con la finalidad de obtener una mayor precisión al momento de efectuar el proceso de restitución, ya que resulta arriesgado realizarla fuera de los límites que encierra el cuadrilátero que une estos puntos. De igual forma poder corregir las inclinaciones longitudinales y transversales de la fase de orientación absoluta (Perdomo et al., 2015).

El Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB, 2000), establece la obligatoriedad de iniciar las mediciones a partir de coordenadas conocidas para garantizar la vinculación con el sistema geodésico nacional. Para vincular un punto de control base desde vértices ya establecidos, los usuarios deberán colocar un receptor GPS en el vértice más conveniente, de acuerdo a las necesidades de su proyecto y cuyas coordenadas son conocidas, y otro receptor sobre el vértice a establecer (ING, 2015).



Imagen 5 Punto de control terrestre fijo.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en la granja experimental de Irquis perteneciente a la Universidad de Cuenca, situada en la provincia del Azuay, cantón Cuenca, parroquia Victoria del Portete.

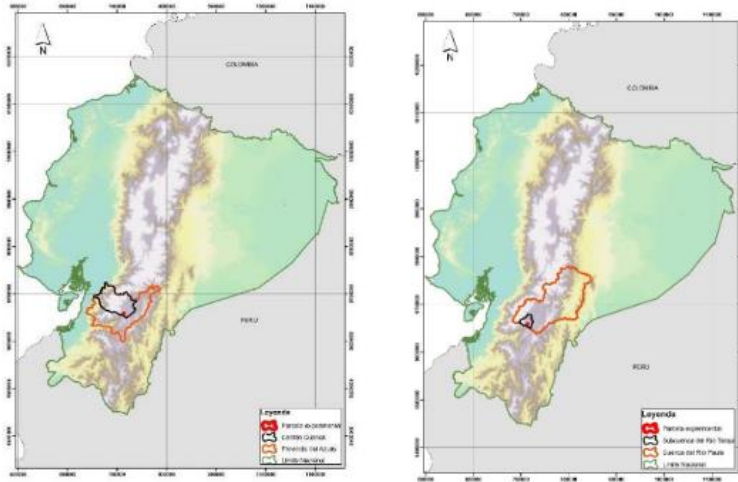


Imagen 6 Mapa de ubicación de la zona de estudio.

Fuente: (Cobos & Narváez, 2018)

A nivel hidrográfico se ubica en la cuenca del río Paute, subcuenca del Tarqui, y micro cuenca del río Tarqui. La granja tiene un rango de altitud que va desde 2636 hasta los 3380 m.s.n.m., entre las coordenadas E 713379 m; E 715889 m; N 9653300 m; N 9659787 m en la Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 17 Hemisferio Sur, Datum Horizontal: Sistema Geodésico Mundial (WGS 84), Datum Vertical: Nivel medio del mar, estación mareográfica de la Libertad, Provincia de Santa Elena 1959 (Cobos & Narváez, 2018). Con la localización geográfica del terreno con coordenadas X: 714153.9 Y: 9659149.1

5.1.1. Características del sitio experimental

Las condiciones meteorológicas donde se realizó el estudio, se tomaron de la estación meteorológica de la Universidad Politécnica Salesiana ubicada en la granja de Irquis de la Universidad de Cuenca; las variables meteorológicas más importantes, se presentan en los siguientes gráficos (Cobos & Narváez, 2018).

- **Radiación solar:** Proceso físico por medio del cual se transmite energía en forma de ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz (300,000 km/s) (Valdés, Riveros, & Arancibia, 2012). Esta se clasifica en: directa, difusa, reflejada y global (Juarez, 2008).

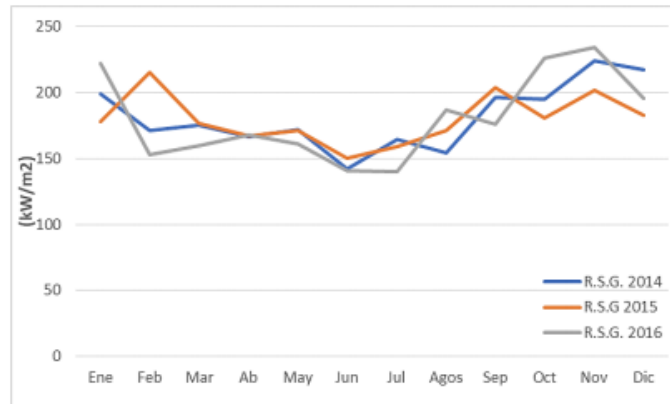


Imagen 7 Radiación Solar presente en el área de estudio.
Fuente: (DIUC, 2016)

- **Precipitación:** Cantidad de agua que cae sobre la superficie terrestre y resulta de la humedad atmosférica, ya sea en estado líquido (llovizna y lluvia) o en estado sólido (escarcha, nieve, granizo) (Piura, 2006). Debido a que la estación meteorológica de granja de Iruquis de la Universidad de Cuenca no se encuentra en funcionamiento hasta la actualidad, fue necesario la ayuda de datos históricos para ver el comportamiento de la variable climática en la zona de estudio.

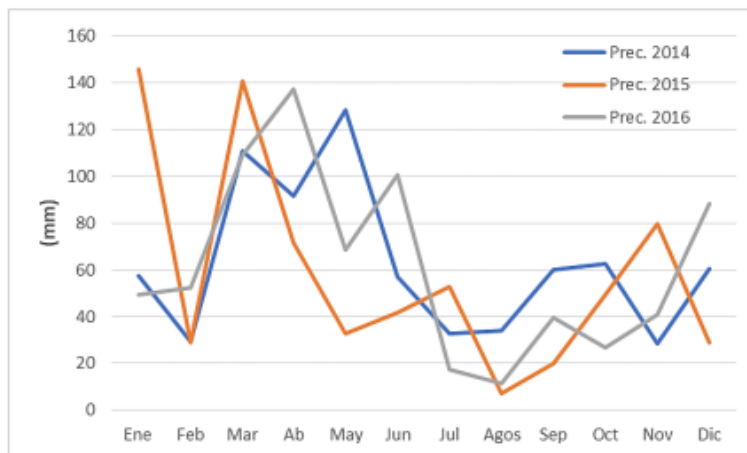


Imagen 8 Precipitación presente en el área de estudio
Fuente: (DIUC, 2016)

- **Humedad relativa:** Saturación de un volumen determinado de aire a una temperatura específica. La humedad relativa del aire resulta de la temperatura y la presión del volumen de aire analizado, esta se representa en porcentaje:
 - 0 aire completamente seco
 - 100% aire saturado (Meteoblue, 2006).

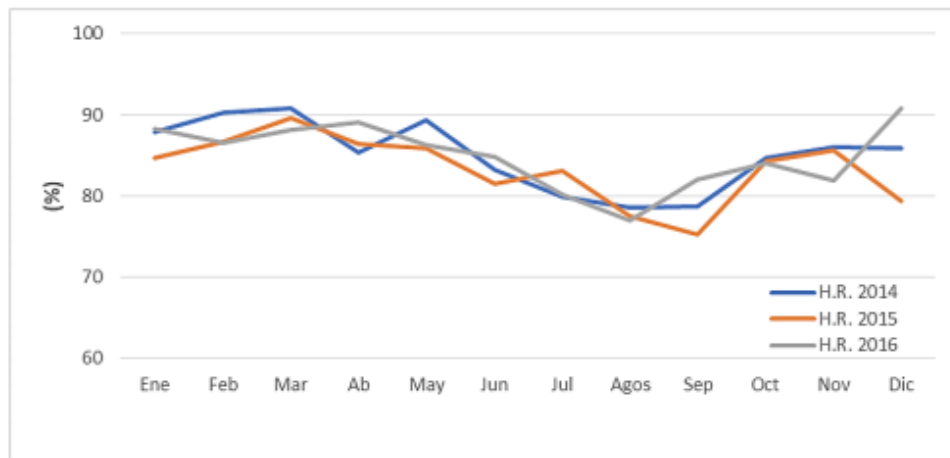


Imagen 9 Humedad relativa del área de estudio.

Fuente: (DIUC, 2016)

- **Temperatura ambiental:** Grado de energía térmica medida en una escala definida (°C), se refiere a la intensidad de calor que puede ser transferida de un cuerpo a otro. Cuando dos sistemas se encuentran a la misma temperatura estos están en equilibrio térmico, por lo tanto no se provocará la transmisión de calor (Cortez & Baribay, 2016).

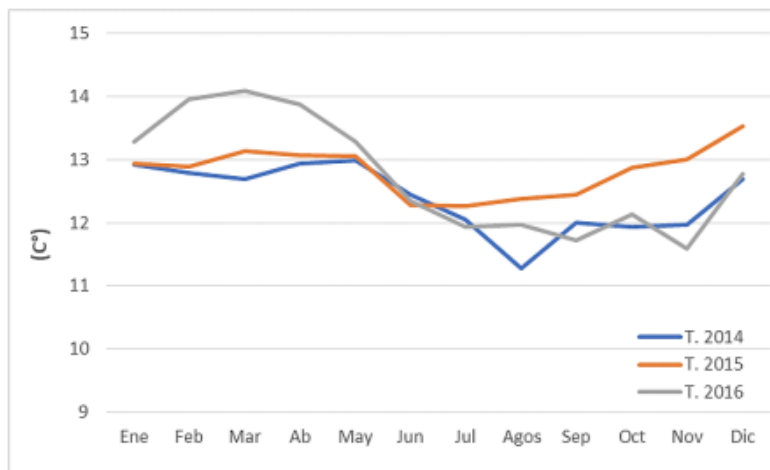


Imagen 10. Temperatura ambiental de la zona de estudio.

Fuente: (DIUC, 2016)

5.1.2. Características edáficas

El tipo de suelo predominante que se encuentra presente en la zona de estudio corresponde al tipo Vertisol (Cobos & Narváez, 2018). Por la clasificación de suelos del WRB, los Vertisoles se diagnostican por la presencia de un horizonte vértico, el cual se caracteriza por tener 30 o más de arcilla, y agregados estructurales inclinados de 10 a 60 grados, y slickensides o caras de fricción. La presencia de bloques prismáticos con caras de deslizamientos bien definidas (Hernandez et al., 2010).



Imagen 11 Perfil del suelo.
Fuente: (DIUC, 2016)

5.2. Materiales

Para el establecimiento del cultivo y levantamiento de la información se utilizaron los siguientes materiales:

Tabla 2 Materiales y equipos

Biológicos	Físicos	Programas	Químicos
- Semilla <i>Hordeum vulgare</i> L. (cebada)	- Dron Mavic Pro	- DJI Pilot	- Urea (46%)
- Agua de riego	- Cámara Parrot Sequoia	- Agisot Metashape	- Glifosato (Rondglis)

- Sensor de luz	versión
	estudiantil
- GPS GNNS	- Qgis
Trimble R8	
- Soporte de	- Infostat
cámara y sensor	versión
	estudiantil
- Tablet, celular	
- Sensor de luz	
- Cinta métrica	
- Etiquetas	
- Puntos de	
control	
(mosaico de	
colores de	
plástico)	
- Postes de	
madera	
- Tractor John	
Deere + arado	
de disco y	
rotavator	
- Balanza	
- Libreta de	
campo	

5.3. Características del campo experimental

Tabla 3 Características del campo experimental.

Descripción	Unidad
Número de tratamientos	4
Número de repeticiones/bloques	4
Número de unidades experimentales	16

Área total del ensayo	2025m ²
Forma de la parcela	Cuadrada
Ancho unidad experimental	10m
Largo unidad experimental	10m
Distancia entre unidades experimentales	1m
Distancia entre bloques	1m
Pendiente promedio de sitio experimental	12%

Diagrama del diseño experimental; disposición de los tratamientos y los bloques en la parcela experimental.

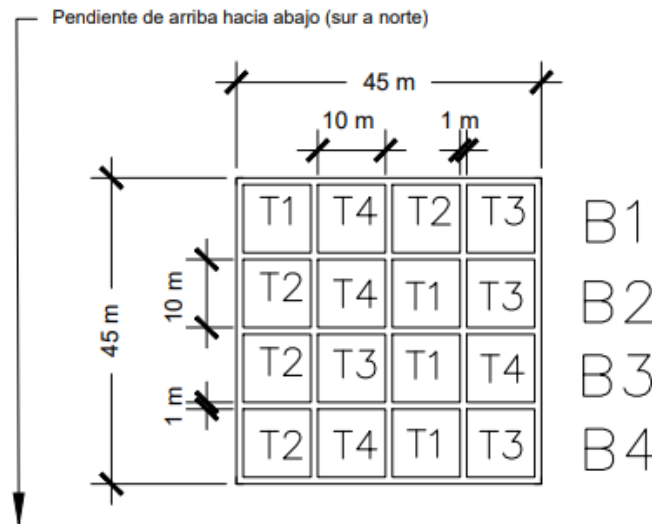


Imagen 12 Distribución espacial en campo de la parcela experimental.

5.4. Diseño estadístico

Se realizó un diseño de bloques completos al azar (D.B.C.A), con cuatro tratamientos (20 N/ha, 60 kg N/ha, 80 kg N/ha y un testigo 0 kg N/ha) con cuatro repeticiones. Para el análisis del efecto de la fertilización nitrogenada a cada uno de los estados fenológicos del cultivo, se empleó ANOVAS con los datos paramétricos y si existe significancia se aplicó Tukey al 5% para comparar las medias de los tratamientos, estos análisis fueron aplicados a la variable de NDVI y categorización del índice. Se utilizó estadística descriptiva e inferencial.

5.5. Metodología

Para el desarrollo de esta experimentación consto de las siguientes actividades: Se preparó el terreno, se estableció el cultivo, se fertilizó, planificó y determinó los parámetros de vuelo, se estableció los puntos de control con GPS, se llevó acabo el vuelo y captura de imágenes multiespectrales, montaje, encendido, configuración y calibración de la cámara Parrot Sequoia, se procesó las imágenes individuales, se generó mapas, se procesó las imágenes multiespectrales, se obtuvo los valores de NDVI y se categorizó las imágenes realizadas tanto en campo como en gabinete. La información fue recolectada a los 51 días después de la siembra (macollamiento), 86 dds (floración) y 112 dds (madurez), tomando en cuenta las fases fenológicas del cultivo, las cuales permitieron ver la respuesta espectral del cultivo en los periodos a diferentes dosis de fertilización.

A continuación, se detallan cada actividad realizada en el experimento.

5.5.1. Preparación del terreno

Se realizó la aplicación de RONDGLIS (glifosato) para reducir la población malezas de esta área y de esta manera se dejó el terreno listo para la entrada del tractor marca John Deere 2850. Se sometió el terreno a 2 aradas de disco y 1 rastra de acuerdo a la literatura citada, esto con el fin de dar las condiciones idóneas para el cultivo (Anexo 1).

5.5.2. Establecimiento del cultivo

Se tomó la muestra de suelo y se analizó en el laboratorio de suelos de la estación experimental del austro en Bulcay, después se obtuvo la semilla registrada de cebada variedad INIAP-Cañicapa 2003 del local comservagro ubicado en las calles Loja y Alfonso Pinzón de la ciudad de Cuenca, todo esto con el fin de garantizar una semilla de calidad y alta germinación. Un día antes de la siembra las semillas fueron lavadas y desinfectadas con Vitavax 200, se empleó la cantidad de 28 kg de semillas tomando en cuenta que se realizó una siembra general con rotavator en toda la parcela. Una vez sembrado se estableció los tratamientos y bloques (Anexo 2).

5.5.3. Fertilización

La fertilización se ejecutó en dos partes, una parte a la siembra y otra parte en el estado fenológico de macollamiento (40 dds). Los tratamientos aplicados fueron de (T0 = 0 kg N/ha de CH₄N₂O); (T1 = 20 kg N/ha de CH₄N₂O); (T2 = 60 kg N/ha de CH₄N₂O); (T3 = 80 kg N/ha de CH₄N₂O), se obtuvo como resultado que la cantidad de urea empelada en total fue de 13.5 kg en toda la experimentación, esto de acuerdo al plan de fertilización dado por el análisis de suelo. (Anexo 3, 4 y 5).

Tabla 4 Tratamientos, etapas y dosis de fertilizante aplicado en las diferentes unidades experimentales de acuerdo al análisis de suelo.

Tratamiento	Etapas	46-0-0 (urea)
T0 (0 kg/ha)	Siembra-Germinación	0
T1 (20 kg/ha)	Siembra-Germinación	0.80 kg
T0 (60 kg/ha)	Siembra-Germinación	2.55 kg
T3 (80 kg/ha)	Siembra-Germinación	3.4 kg
T0 (0 kg/ha)	Macollamiento	0
T1 (20 kg/ha)	Macollamiento	0.80 kg
T2 (60 kg/ha)	Macollamiento	2.55 kg
T3 (80 kg/ha)	Macollamiento	3.4 kg
	Total	13.5 kg

5.5.4. Riego por aspersión

Debido a que el cultivo se sembró en el mes de agosto, y para dichas fechas la precipitación de la zona era deficiente para el desarrollo óptimo del mismo, fue necesario implementar un sistema de riego por aspersión. El diseño de riego constaba de 2 líneas de riego, con un total de 21 aspersores de tipo bailarina ¾ xcel, con un diámetro de 15 metros y un caudal de 700 l/h cada aspersor. Cabe recalcar que el cultivo fue regado por 1 hora hasta que este llegue a capacidad de campo (CC), el riego se realizó cada 2 días a partir de la siembra hasta la fase fenológica de espigamiento, dando un aproximado de 30 riegos en el transcurso de desarrollo del cultivo.



Imagen 13 Aplicación de riego el día de la siembra (izquierda) y, riego en la fase fenológica de macollamiento 56 dds (derecha).

5.5.5. Planificación y determinación de parámetros de vuelo

Para la toma de datos con el vuelo del dron se tomó en cuenta los parámetros como: dron empleado, cámara empleada, topografía, cantidad de terreno a muestrear, clima y limpieza del lugar, para de esta manera llevar a cabo la misión de manera exitosa y de así poder obtener imágenes multiespectrales válidas para el estudio. Mediante el software mission planner se estimó los parámetros de vuelo ejecutados en la zona estudiada, debido a la cercanía de la parcela experimental a los árboles de pino presente en la zona se terminó volando a 40 metros de altura que arrojó como resultado las siguientes características de vuelo descrito en la tabla 6. (Ver anexo 6)

Tabla 5 Parámetros de vuelo dados por el software mission planner.

Parámetros	Resultado
Traslapo longitudinal	80%
Traslapo transversal	80 %
Altura de vuelo	40 metros
Velocidad	5 m/s
Líneas de vuelo	6
Área terreno	2590 m ²
Imágenes tomadas	30
Tiempo de vuelo	1 minuto 41 segundos
Intervalo de toma de foto	2 segundos
GSD	3.65 cm/pix

5.5.6. Establecimiento de puntos de control con GPS GNSS

La actividad consintió en la toma de los puntos de control en la parcela experimental, se tomaron 5 puntos de control uno en cada esquina y uno en el centro, esto con el fin que el estudio realizado tenga un apoyo terrestre que ayude a coincidir los pixeles de cada tratamiento con las tres imágenes a los diferentes estados fenológicos evaluados, garantizando de esta manera que cada vez que sea realizado el análisis del índice NDVI sea exactamente aplicado a los mismos pixeles.

El levantamiento de los puntos de control se realizó con un GNSS marca Trimble R8 en el cual se aplicó la metodología de levantamiento estática-relativa que consistió en estacionar un receptor fijo en un punto de coordenadas conocidas, en este caso un vértice perteneciente a una determinada red geodésica (X en la piedra imagen a la izquierda), y este fue colocado a una altura de 1.55 metros y otro receptor que se va movilizand por todos los puntos de apoyo de los cuales es necesario conocer sus coordenadas.



Imagen 14 Calibración y colocación de GNSS estático (izquierda) y toma de puntos con el GNSS relativo o móvil (derecha).

5.5.7. Vuelo y captura de imágenes multiespectrales

Antes de realizar el vuelo, en cada uno de los puntos de control identificados se colocó las marcas de fotocontrol (mosaico de plástico), esto con el fin de poder georreferenciar las

imágenes obtenidas en el software de post procesamiento. Después se realizó la calibración de los equipos utilizados para la toma de las imágenes multiespectrales.



Imagen 15 Colocación de marcas de fotocontrol de plástico con mosaico de colores.

5.5.8. Montaje, encendido, configuración y calibración de la cámara Parrot Sequoia

Antes de poner en uso la cámara Parrot Sequoia, esta tuvo que ser sincronizada con el Dron Mavic Pro. El montaje se realizó sobre una estructura de fibra de carbono, la cual ayudó de base para sostener la cámara y el sensor de luz acoplado al dron para realizar el vuelo. Posteriormente se conectó los accesorios entre sí con la ayuda de dos cables uno a la fuente de poder del dron conectado a la cámara multiespectral para suministrarle energía, el otro cable va conectado al sensor de luz el cual capta la cantidad de luz exterior y realiza una corrección más precisa en las imágenes, es decir realiza la corrección radiométrica en las diferentes longitudes de ondas que la cámara captura las imágenes.



Imagen 16 Montaje de cámara y sensor de luz al dron Mavic Pro

Se realizó el encendido del equipo y automáticamente prendió la cámara con su respectivo sensor de luz, luego se conectó la misma a un dispositivo externo (computador, celular o tablet) que tenga la capacidad de enlazarse a la señal wifi emitida por la cámara para una configuración pre vuelo.

La configuración se llevó a cabo con el celular marca Samsung A51, se ingresó a la red wifi de la cámara según su nombre de usuario predeterminado Sequoia 2019. Esta acción permite ingresar hacia la página de Parrot Sequoia, en donde se configuró la cámara desde dicho dispositivo. De este modo se pudo cambiar aspectos esenciales de la configuración como: almacenamiento de las imágenes tomadas, tiempo de captura de las imágenes, en este caso cada 2 segundos debido que la cámara ofrece como mínimo esa velocidad de obturación y traslape longitudinal y transversal.

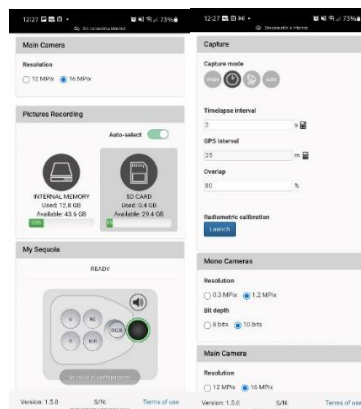


Imagen 17 Configuración mediante la red wifi emitida por la cámara multiespectral.

La calibración se realizó mediante un calibrador externo que la misma cámara dispone para poder tener imágenes de mayor calidad, se colocó el calibrador a nivel del suelo en una superficie plana, luego mediante la conexión de la cámara con el celular se entra en calibración radiométrica y sosteniendo el dron a una altura del pecho del usuario y a una distancia longitudinal de 30 cm del calibrador se empezaron a disparar las fotos para luego realizar el vuelo.

Se debe tomar en cuenta que esta calibración es determinada para un tipo de luz uniforme al momento de realizar el vuelo, si existe algún tipo de cambio en la cantidad de luz realizada en la calibración con la del momento del vuelo este debe volver a ser calibrado nuevamente porque proporcionara datos erróneos por los cambios brutos de luz bajo a las condiciones cambiantes por ellos en este estudio se realizaron los vuelos a partir de las 11:30 am, que son las horas que brindan ventanas de luz más uniforme durante varios minutos.



Imagen 18 Calibración radiométrica externa de la luz en tiempo real.

Una vez realizados todas estas condiciones y parámetros se procedió a la captura de las imágenes. Se utilizó el software DJI Pilot que fue el programa donde se corrió el vuelo programado por el equipo de trabajo, automáticamente el dron fue al punto de partida donde empezó con la toma de imágenes, entre todos los vuelos realizados tuvieron una duración media de 1 minuto con 50 segundos y consumo de batería entre el 50% al 70%, esto fue directamente influenciado por las condiciones climáticas del día en que se realizaron los vuelos. Una vez realizada la misión el dron regresa al punto de partida y está listo para ser guardado y llevado al laboratorio de geomática para descargar las imágenes.

5.5.9. Procesamiento de imágenes individuales

Se transfirieron las imágenes guardadas en la memoria externa de la cámara al computador para su respectivo procesamiento. Luego para realizar el procesamiento de dichas imágenes se usó el software Agisoft Metashape, debido a que es de fácil y rápido manejo para la tarea solicitada, se añadió las imágenes, después se colocó los puntos de referencia en el software de procesamiento ya antes tomados con el GNSS, para este proceso se tuvo que ingresar los puntos de control terrestres y luego a cada imagen ir buscando los mosaico de colores captados en cada imagen y el operador buscar de manera exacta el punto de referencia visto en la misma validando dicho punto, es de vital importancia colocar la georreferenciación en el centro del mosaico de colores de la imagen vista, inmediatamente realizada la tarea se dió en optimizar cámaras para que el programa empleado realice una coincidencia de pixeles en todas las imágenes con los puntos de referencia validados por el operador y así dar una georreferenciación más exacta.

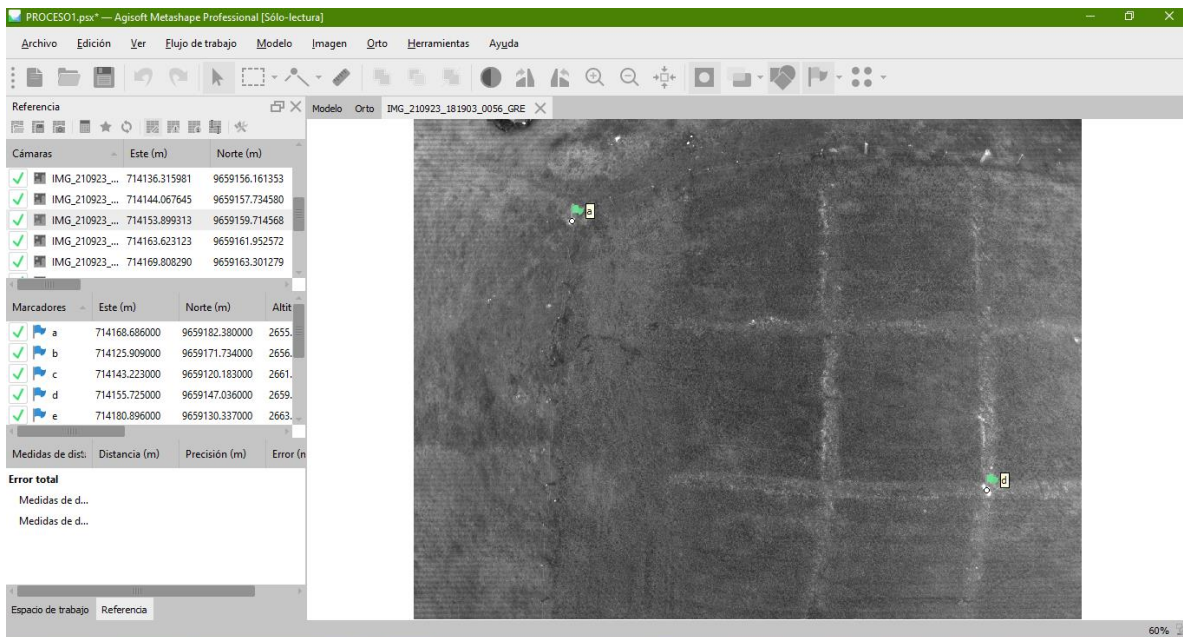


Imagen 19 Georreferenciación de las imágenes, los banderines de color verde significa que el operador ha colocado el punto de control de manera manual y este se encuentra georreferenciado según el código de cada control.

5.5.10. Generación de mapas (ortoimagen)

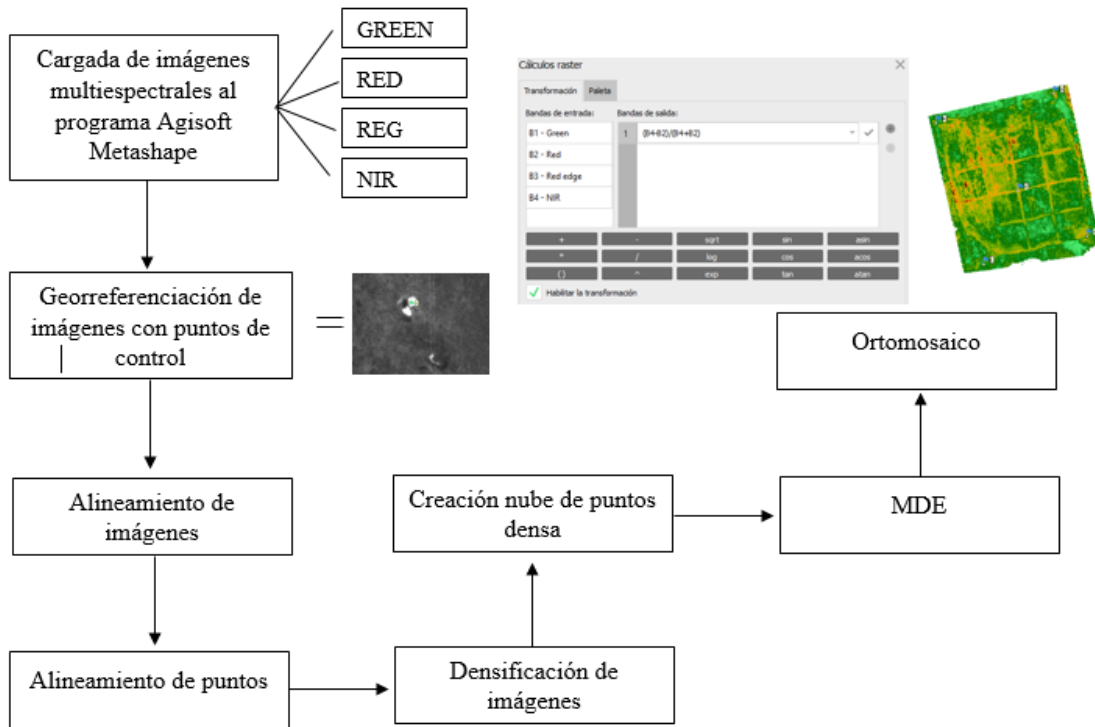


Figura 1 Diagrama del proceso espectral para la creación del mapa y el índice NDVI en Agisoft Metashape

Una vez realizada la georreferenciación se procede a la creación de la nube de puntos densa, MDE y ortomosaico, que proporcionó una imagen única de todas las imágenes antes capturadas en las diferentes bandas del espectro electromagnético en este caso (verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano). Es el mismo software de procesamiento empleado el que brinda una función en la calculadora raster para la creación de índices de vegetación, en este caso se creó el índice de diferencia normalizada NDVI, que no es más que la combinación de las bandas rojo e infrarrojo cercano $(NIR-RED/NIR+RED)$. Esta información creada en el Agisoft Metashape, fue llevada luego al Qgis para realizar análisis posteriores.

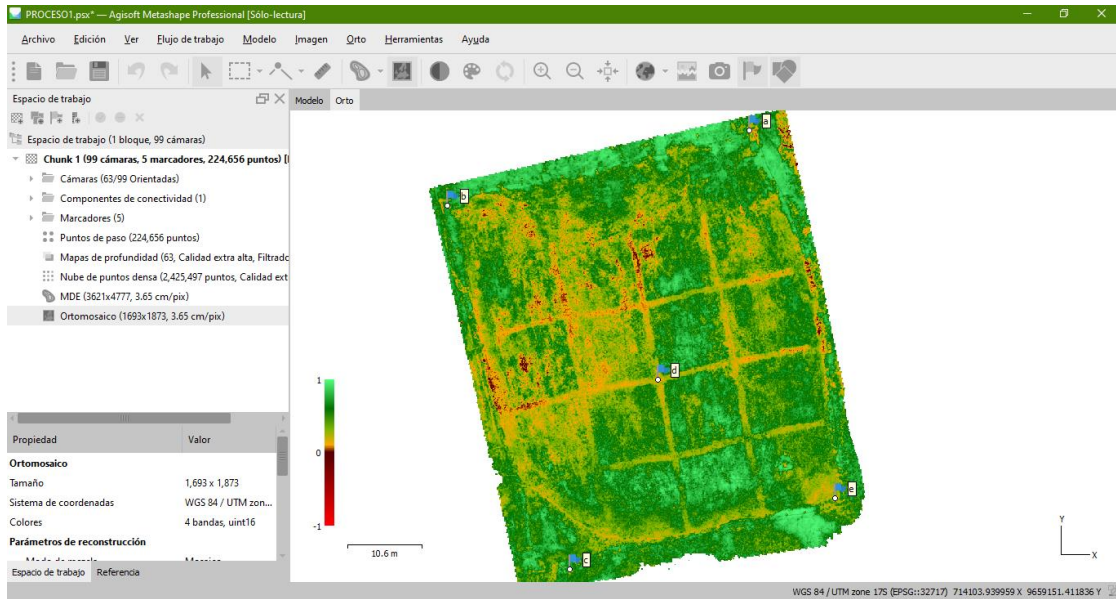


Imagen 20 Resultado final del ortomosaico realizado.

5.5.11. Procesamiento de imágenes multispectrales

Una vez obtenido los diferentes índices en formato (*.TIFF), se trabaja con ellos desde Qgis para procesar la imagen multispectral obtenida en el Agisoft metashape.

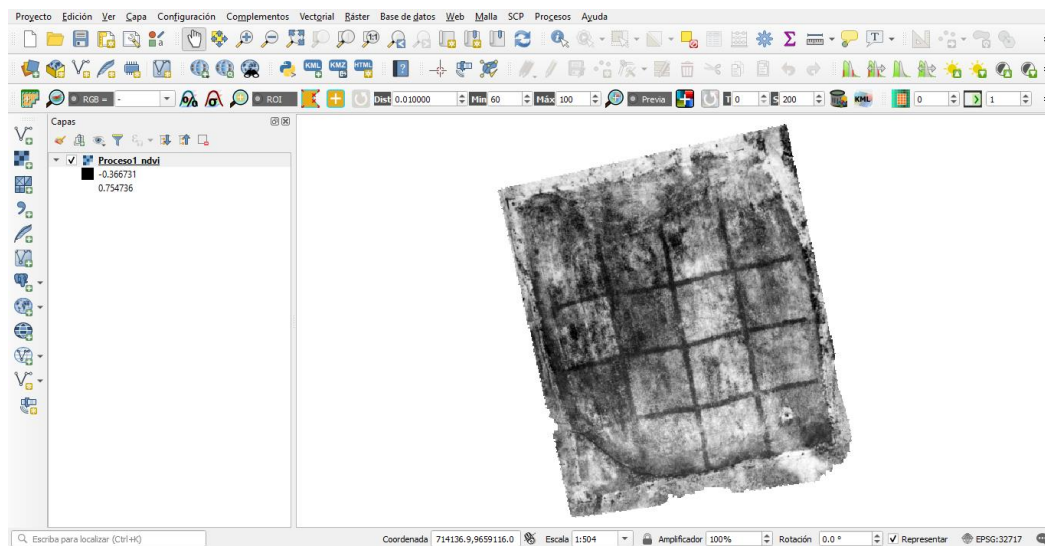


Imagen 21 Imagen multispectral usada para la obtención de datos del índice NDVI.

Ingresa la imagen en el software de procesamiento se procedió agregar los diferentes puntos georreferenciados de las unidades experimentales, esto para unir los puntos y así poder diseñar cada unidad experimental.

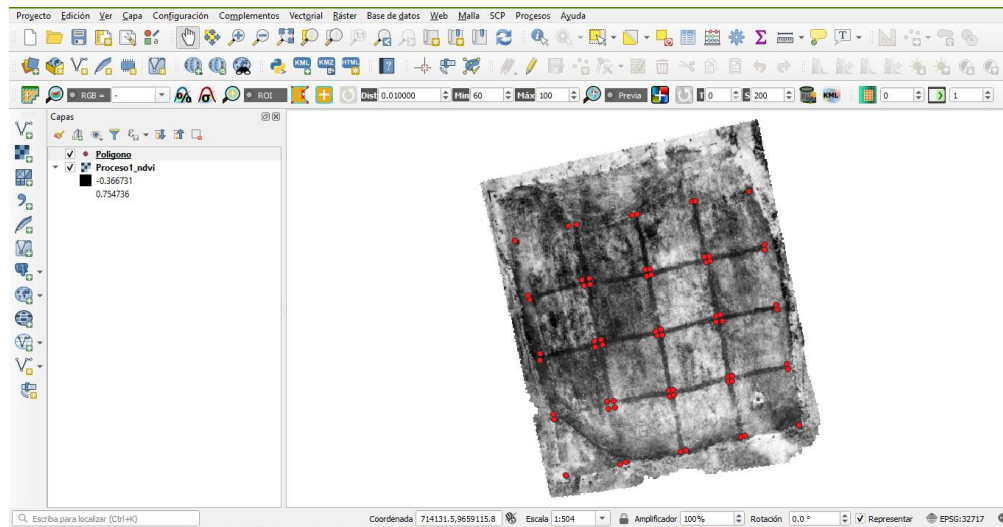


Imagen 22 Imagen multispectral más puntos georreferenciados de las unidades experimentales

5.5.12. Obtención de valores de NDVI

Una vez creada las unidades experimentales en el software de procesamiento, se realizó el corte de los pixeles de cada una de las mismas con el geoproceso cortar raster por capa de mascara, este proceso ayuda a cortar una capa raster con una capa vectorial y de esta manera poder obtener los pixeles de cada unidad experimental muestreada.

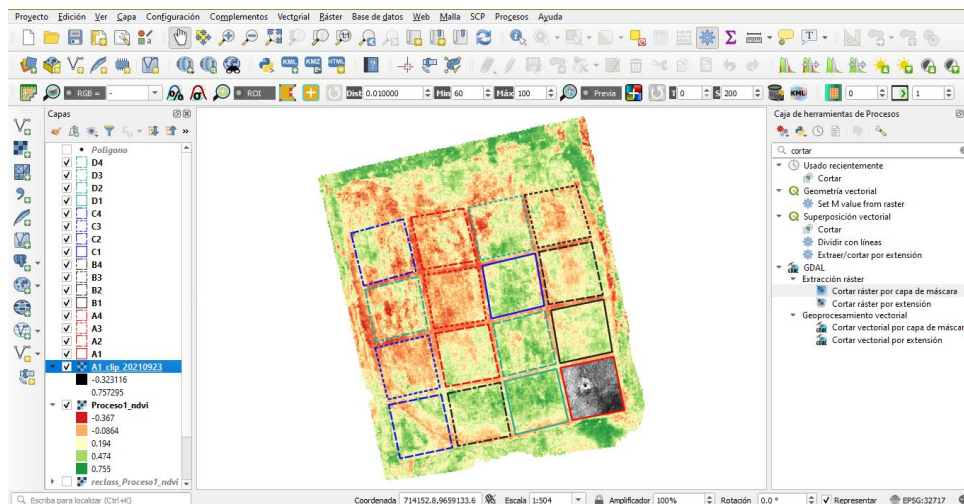


Imagen 23 Cortes realizados a las diferentes unidades experimentales a muestrear.

Luego de realizar el corte a la unidad experimental deseada para obtener los valores del índice NDVI se hizo clic en propiedades del recorte conseguido, se abrió una ventana de

información donde brinda información como valor de pixel máximo, medio, mínimo y desviación estándar para la creación de la base de datos.

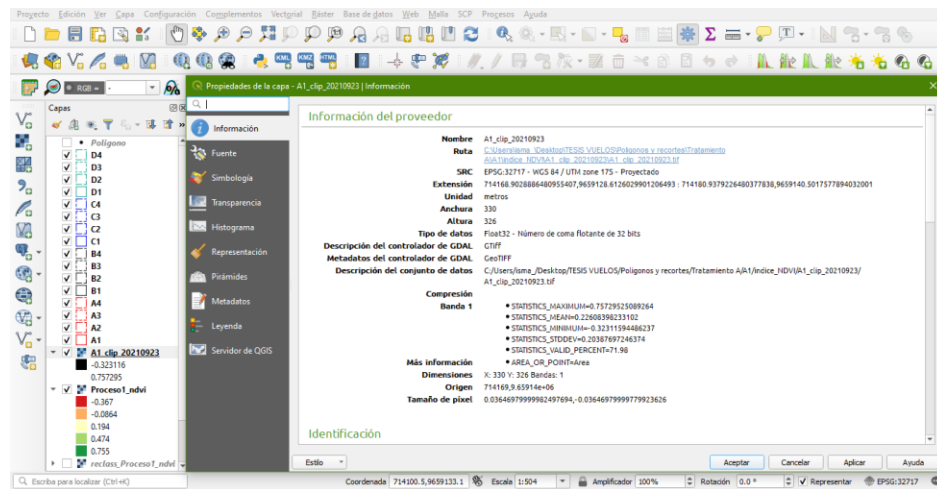


Imagen 24 Ventana de información de donde sacamos los datos de cada una de las unidades experimentales muestreadas para la creación de nuestra base de datos.

5.5.13. Categorización de imágenes

Para categorizar las imágenes se utilizó el geoproceso reclasificar por tabla, se hizo una reclasificación de general de toda la imagen donde se agrupó por categorías los valores de los píxeles.

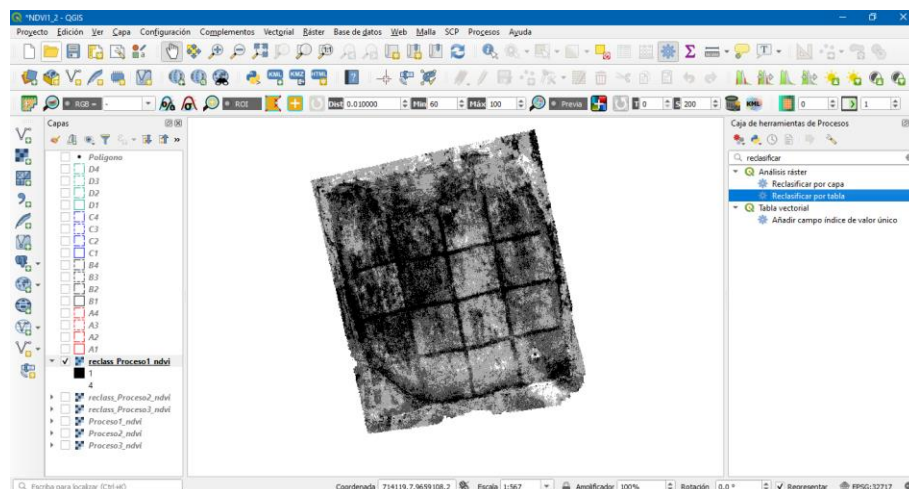


Imagen 25 Reclasificación de los valores NDVI en categorías.

En este caso se realizó el criterio de clasificación agrupado en dos clases, denominamos a la primera categoría como **vegetación enferma o escasa** que va de 0 – 0.33 y la segunda

categoría llamada vegetación sana o densa que va de 0.33 – 1. Se dio clic en tabla de clasificación y se añadió las categorías mencionadas para realizar dicho proceso.

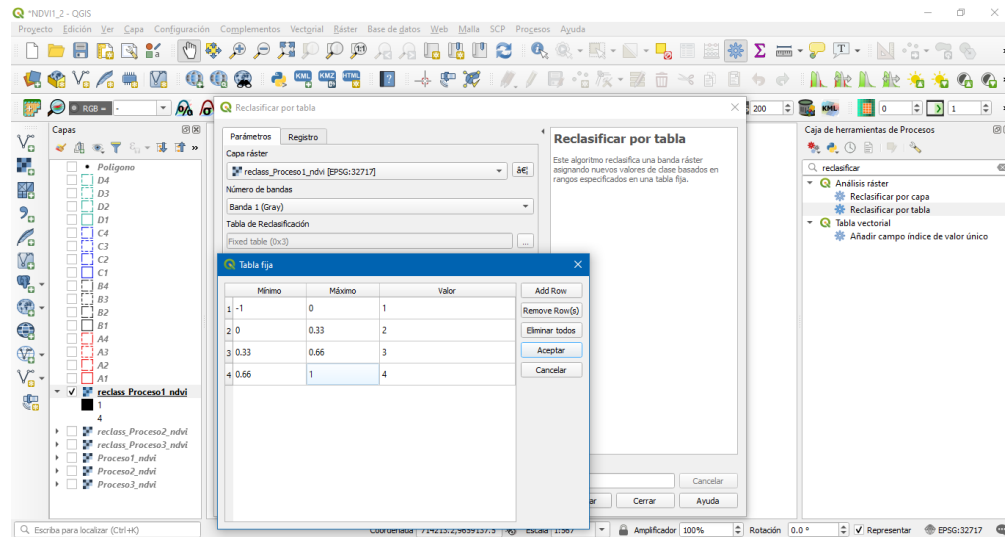


Imagen 26 Valores de cada una de las categorías agrupadas por los valores de los pixeles.

Luego se realizó el corte uno a uno a cada unidad experimental de la imagen categorizada en general con el geoproceso cortar raster por capa de máscara y su respectivo conteo del número de pixel agrupado por cada categoría con el geoproceso informe de valores únicos de capa raster. Estos valores fueron llevados a la base de datos de este estudio para la obtención de los resultados.

Archivo analizado: C:/Users/isma_/Desktop/Tesis vuelos/Poligonos y recortes/Tratamiento A/A1/reclass/A1_clip_reclass_20210923/A1_clip_reclass_20210923.tif (banda 1)
 Extensi: 714168.9028886480955407,9659128.6126029901206493 : 714180.9379226480377838,9659140.5017577894032001
 Proyecci: WGS 84 / UTM zone 17S (EPSG:32717)
 Anchura en p: 330 (unidades por p: 0.0364698)
 Altura en p: 326 (unidades por p: 0.0364698)
 Número total de p: 107580
 Número de p: SINDATOS: 30149
 Valor Número de p: Área (m²)
 1 12221 16.25449597838196
 2 40627 54.03579151572898
 3 23876 31.75618574419832
 4 707 0.9403427425510225

Imagen 27 Archivo de extensión HTML, que nos propinó la información del número de pixeles agrupado por categoría.

6. RESULTADOS

6.1. Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) del cultivo para las 3 fases fenológicas.

Se realizó la prueba de normalidad y homocedasticidad (test de Levene) las cuales cumplieron con los supuestos de ANOVA ($p > 0.005$) en todas las etapas fenológicas estudiadas.

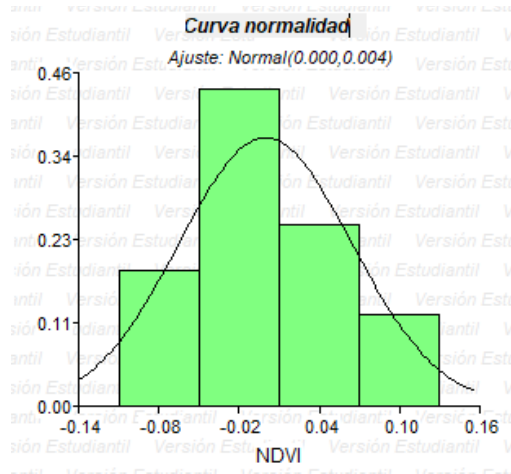


Figura 2 Curva de normalidad para la fase fenológica de espigamiento (86 dds), obteniendo un valor de $p > 0.005$ ($p = 0.9009$).

Por la normalidad obtenida en los datos, se aplicó para el primer objetivo estadístico de tipo descriptivo realizando pruebas de ANOVA con el test de Tukey, con un nivel p de significancia del 0,05.

6.1.1. Evaluación del NDVI para la fase fenológica de macollamiento (51 dds).

Tabla 6 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los valores de NDVI entre tratamientos.

Tratamientos			NDVI	
1	T4	80 kg/ha	0.25	A
2	T2	20 kg/ha	0.20	A
3	T3	60 kg/ha	0.18	A
4	T1	0 kg/ha	0.10	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

De acuerdo a los resultados obtenidos del procesamiento del índice NDVI para la fase fenológica de macollamiento se evidenció que no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados ($p > 0.3802$), sin embargo, se puede visualizar matemáticamente que el T4 (80 kg/ha) con un valor medio de 0.25 fue el tratamiento con mejor respuesta espectral a la aplicación urea, mientras tanto el tratamiento con menor respuesta fue el T1 (testigo) con un valor de 0.10.

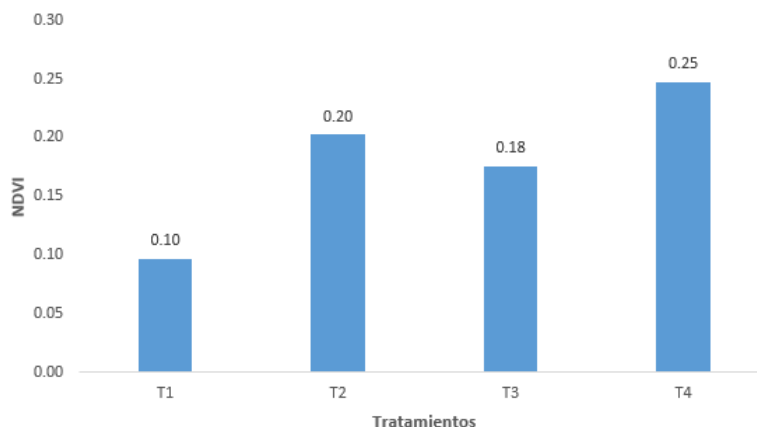


Figura 3 Promedio de las medias del índice NDVI para la fase fenológica de macollamiento.

6.1.2. Evaluación del NDVI para la fase fenológica de espigamiento (86 dds).

Tabla 7 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los valores de NDVI entre tratamientos.

Tratamientos			NDVI	
1	T4	80 kg/ha	0.45	A
2	T3	60 kg/ha	0.42	A
3	T2	20 kg/ha	0.39	A B
4	T1	0 kg/ha	0.24	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

De acuerdo a los resultados obtenidos del procesamiento del índice NDVI para la fase fenológica de espigamiento, se registró que existe diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.0104$) agrupados en dos rangos, se pudo evidenciar que el T4 (0.45), T3 (0.42) y T2 (0.39) fueron los que presenciaron un valor más cercano a uno de acuerdo al índice NDVI, reflejando que el cultivo bajo estas circunstancias se encuentra sano, pero estos no presentaron diferencias significativas entre ellos, en contraste con el T1 (0.24) que mostró

el valor más bajo de NDVI, existiendo diferencia significativa entre el control con las tratamientos de FN, en este caso urea.

6.1.3. Evaluación del NDVI para la fase fenológica de madurez (112 dds).

Tabla 8 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los valores de NDVI entre tratamientos.

Tratamientos			NDVI	
1	T1	0 kg/ha	-0.12	A
2	T2	20 kg/ha	-0.15	A
3	T4	80 kg/ha	-0.18	A
4	T3	60 kg/ha	-0.27	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

De acuerdo con los resultados del procesamiento del índice NDVI para la fase fenológica de madurez, se determinó que no existe diferencia significativa entre los tratamientos aplicados ($p > 0.2640$). Sin embargo, se puede visualizar matemáticamente que el T3 y T4 con valores de -0.27 y -0.18 reflejaron mejores respuestas a la aplicación urea presentando una madurez fisiológica más precoz, en contraste con los T2 y T1 que con un valor de -0.15 y -0.12 reflejaron un tiempo de madurez más tardío.

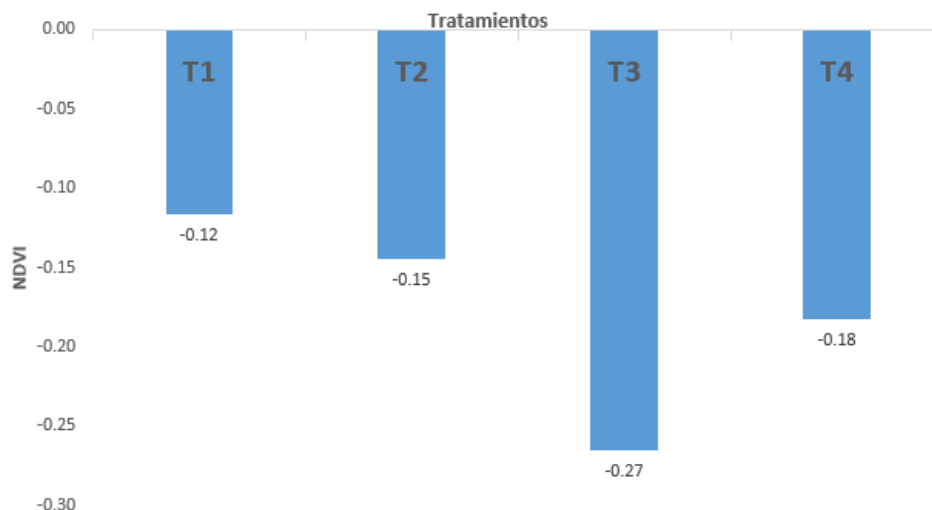


Figura 4 Promedio de las medias del índice NDVI para la fase fenológica de madurez.

6.1.4. Comparación de los valores del índice NDVI en los diferentes estados fenológicos del cultivo.

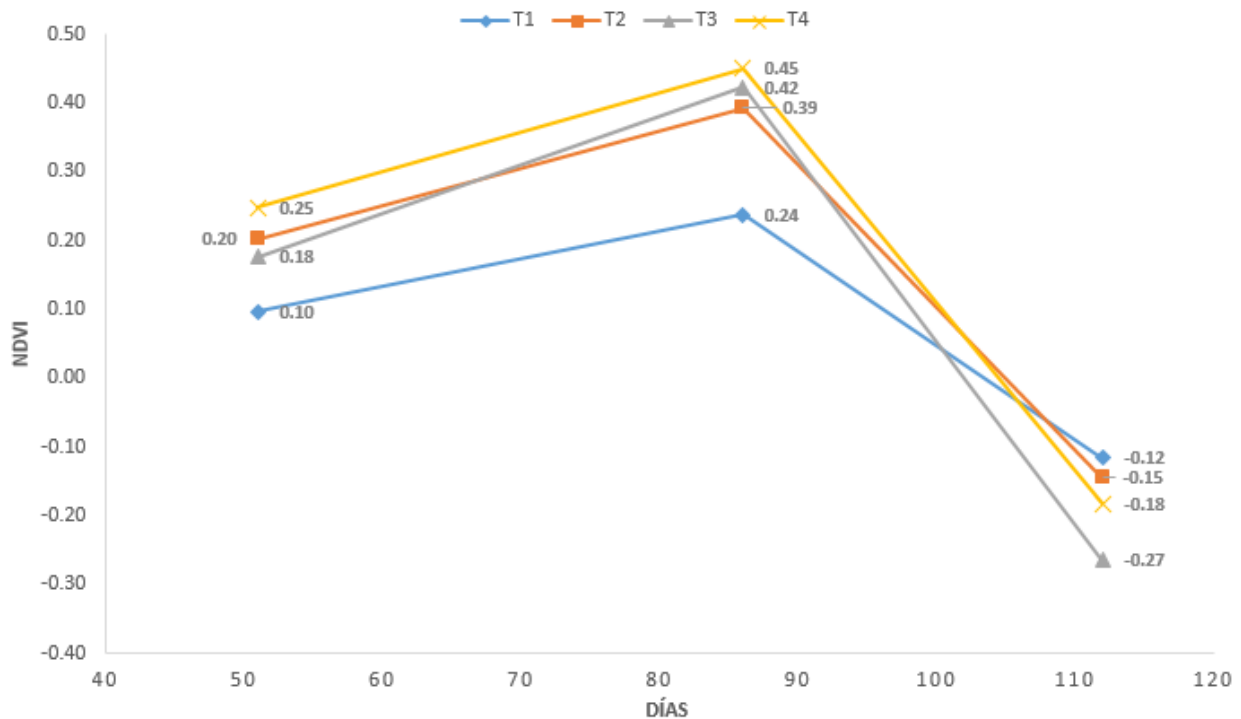


Figura 5 Variación de los valores de NDVI en los estados fenológicos de macollo (51 dds), espiga (86 dds) y madurez (112 dds)

6.2. Análisis de la categorización del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para las 3 fases fenológicas.

Se realizó la prueba de normalidad y homocedasticidad (test de Levene) las cuales cumplieron con los supuestos de ANOVA ($p > 0.005$) en todas las tres etapas fenológicas.

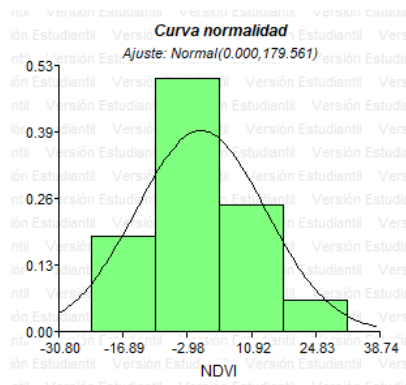


Figura 6 Curva de normalidad de la categorización del índice NDVI para la fase fenológica de macollamiento (51 dds), obteniendo un valor de $p > 0.005$ ($p = 0.5276$).

Por la normalidad obtenida en los datos, se aplicó estadística descriptiva, realizando pruebas de ANOVA con el test de Tukey, con un nivel p de significancia del 0.05.

6.2.1. Evaluación del NDVI categorizado para la fase fenológica de macollamiento (51 dds).

Para la fase fenológica de macollamiento se evidenció que no existe diferencia significativa entre los tratamientos empleados ($p > 0.2044$) (Tabla 10). Sin embargo, de manera matemática para esta fase fenológica el tratamiento T4 (46.63%) fue el que presento la mayor cantidad de pixeles sanos y el T1 (82.20%) fue el que evidenció la mayor cantidad de pixeles enfermos (Figura 8).

Tabla 9 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los porcentajes del NDVI categorizado entre tratamientos para la fase fenológica de macollamiento.

Tratamientos			NDVI			
			Vegetación sana (%)		Vegetación enferma (%)	
1	T1	0 kg/ha	17.80	A	82.20	A
2	T2	20 kg/ha	31.66	A	68.34	A
3	T3	60 kg/ha	34.56	A	64.44	A
4	T4	80 kg/ha	46.63	A	53.37	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

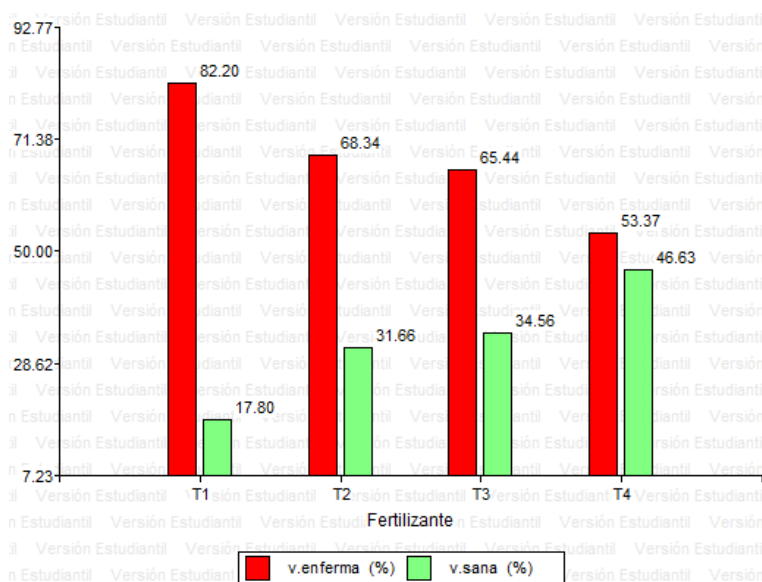


Figura 7 NDVI categorizado que muestra el porcentaje de pixeles de la vegetación enferma y sana.

6.2.2. Evaluación del NDVI categorizado para la fase fenológica de espiga (86 dds) y madurez (112 dds).

Para la fase fenológica de espiga existió diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0.0021$) agrupado en dos rangos. Para dicha fase la categorización del índice NDVI nos permite diferenciar de manera fácil y explícita que los tratamientos T4 (81.85%), T3 (76.18%) y T2 (54.61) tuvieron un efecto positivo sobre su testigo ya que presentaron la mayor cantidad de pixeles sanos, el T4 fue el que mostró la mayor cantidad de pixeles enfermos con un (65.48%) por encima del resto.

Tabla 10 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los porcentajes del NDVI categorizado entre tratamientos, para la fase fenológica de espiga.

Tratamientos			NDVI			
			Vegetación sana (%)		Vegetación enferma (%)	
1	T1	0 kg/ha	34.52	B	65.48	A
2	T2	20 kg/ha	64.61	A	35.39	B
3	T3	60 kg/ha	76.18	A	23.22	B
4	T4	80 kg/ha	81.85	A	18.16	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

En la fase fenológica de madurez no existieron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.1102$). Sin embargo, de manera matemática los T4 (99.89%) presentaron la mayor cantidad de pixeles enfermos o de baja actividad fotosintética, mientras que los T1 fueron los que mostraron la mayor cantidad de pixeles sanos o con actividad fotosintética activa, con un 2.74%.

Tabla 11 Resultados de la prueba de Tukey al 5%, comparando las medias de los porcentajes del NDVI categorizado entre tratamientos para la fase fenológica de madurez del cultivo.

Tratamientos			NDVI			
			Vegetación sana (%)		Vegetación enferma (%)	
1	T1	0 kg/ha	2.74	A	97.26	A
2	T2	20 kg/ha	1.18	A	98.82	A
3	T3	60 kg/ha	1.25	A	98.76	A
4	T4	80 kg/ha	0.11	A	99.89	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

7. DISCUSIÓN

Para la fase fenológica de macollamiento no fue posible, mediante el índice NDVI y la categorización de imágenes, encontrar diferencias significativas entre los tratamientos mediante la respuesta espectral del cultivo. Esto debido a que al momento en que se realizó la captura de la imagen, es decir a los 51 dds, el cultivo aún no completaba su máximo desarrollo de biomasa como lo reporta Guzman et al., (2015) donde menciona que el cultivo de cebada tiene un ciclo de 150 a 160 días. Para nuestra variedad esta consta de 170 a 180 días y el periodo de macollaje empieza desde los 31 hasta los 60 días, siendo este el factor limitante que nos impidió ver la respuesta espectral o evaluar su estado nutricional bajo el efecto de las dosificaciones, hecho que concuerda con el estudio realizado por Ross & Lopez de Sabando (2021), donde corroboran que el empleo del índice NDVI como herramienta para monitorear la nutrición nitrogenada en trigo y cebada se debe aplicar luego que el cultivo generó una biomasa considerable es decir finalizada la etapa de macollaje en adelante. Por ese motivo no es viable realizar los análisis en las fases fenológicas anteriores debido a que no refleja la eficiencia de la fertilización. En otro estudio realizado por Polanía (2017), donde evaluó el estado nutricional del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) por medio de respuestas espectrales en diferentes estados fenológicos presentando resultados similares a los de este estudio, reportó que la mayoría de los índices presentaron diferencias significativas en los tratamientos, con diferencias claras del testigo respecto de las dosis de 160, 200 y 240 kg/ha de N, pero presenciando poca o ninguna diferencia entre las primeras etapas fenológicas, así como poca o ninguna diferencia para las etapas fenológicas finales. Esto debido principalmente a que en el estado fenológico de macollamiento las parcelas aun no presentan contraste con respecto a la incorporación de las cantidades de N por tratamiento, ya que el arroz al igual que el resto de cereales absorbe activamente N para aprovecharlos en la síntesis de proteínas y producción de macollas, además a la alta cantidad de N que requiere para el desarrollo del crecimiento y producción.

En el caso del análisis del índice NDVI y la categorización de imágenes para la fase fenológica de espiga, se obtuvo diferencias significativas para los tratamientos en contraste con el control, reflejando que la aplicación de fertilizante nitrogenado tuvo incidencia directa

sobre la respuesta espectral del cultivo, es decir su tendencia demuestra que a mayor cantidad de fertilizante nitrogenado empleado el valor de NDVI aumenta, reflejando plantas más sanas, vigorosas y de mejor estado nutricional. Se determinó que para esta fase la diferenciación de la respuesta fotosintética se debió a que el cultivo logró incorporar el fertilizante disponible en el suelo en su sistema de manera elevada, de acuerdo al tiempo de muestreo de la imagen. Garófalo (2012) menciona que el nitrógeno participa activamente en los procesos metabólicos: fotosíntesis, respiración y síntesis proteica, y que los días de máxima absorción de los macronutrientes se encuentra entre los 35 hasta los 82 días, el nitrógeno específicamente su máxima velocidad de absorción se da entre los 43 a 59 días.

Resultado que se asemeja al estudio de Goñi Labat (2018) quien empleó en cereales de invierno (cebada y trigo) fertilización nitrogenada agrupada en categorías: baja (0-120 UFN), correcta (121-180 UFN) y alta (181-250 UFN), registrando que para todos los índices empleados en su investigación excepto en MCARI, S2REP y MTVI2/MCARI el rango que da mayores valores del índice NDVI fue la categoría correcta (121-180 UFN), mientras que el menor valor lo obtuvieron con la categoría alta (181-250 UFN). Determinando así que si se excede las dosis de fertilizante nitrogenado recomendadas se traduce en un menor valor índice de NDVI, verdor de la planta o vigor, esto debido a que el exceso de nitrógeno produce plantas que pueden ser susceptibles al vuelco y a enfermedades que disminuirán el rendimiento y aumentarán el costo de fertilización (Oropesa, 2012). Las dosis superiores a las del óptimo económico la eficiencia disminuye drásticamente, y por encima del máximo técnico la presencia de más nitrógeno en el suelo no se traduce a mayor producción (en muchas ocasiones lo contrario) de modo que en parte se produce el denominado “consumo de lujo” y en parte se crean excedentes de nitrógeno mineral en el suelo, inevitablemente expuestas al lavado (Andreu et al., 2000).

Para la fase de madurez no fue posible, mediante el índice NDVI y la categorización de imágenes, encontrar diferencias significativas entre los tratamientos, esto se debe a que a que el cultivo de cebada al entrar en fase fenológica de maduración empieza a perder actividad fotosintética (clorofila) y, por ende, al momento de realizar el muestreo, este se refleja como un cultivo enfermo, estresado o de baja actividad fotosintética. Sin embargo, esto no es más que la madurez fisiológica del cultivo evidente en esta fase, mostrando los

valores de los índices que comienzan a decrecer, ya que después de la floración, las hojas pierden su color verde pues el nitrógeno es redistribuido a los granos. Esto es debido a que después de la floración, tanto el trigo como la cebada extraen poco nitrógeno del suelo, por lo que los granos en desarrollo tienen que obtener casi todo su nitrógeno del que está almacenado en la planta, de las hojas verdes. Esta es la principal razón por la cual las hojas pierden su color verde y mueren ya que el nitrógeno es redistribuido a los granos. Cuanto menor sea la cantidad de nitrógeno almacenado, más rápidamente morirán las hojas (Goñi Labat, 2018). En otro estudio realizado por López de Sabando y Zubillaga (2012), en donde se evalúa índices espectrales según fertilización nitrogenada y zonas de productividad de trigo a diferentes dosis de fertilización nitrogenada, se emplearon cinco tratamientos de fertilización nitrogenada: 0 kg N ha (N0), 40 kg N ha (N40), 80 kg ha (N N80), 120 kg N ha (N120) y 160 kg N ha, argumentando que durante la etapa de senescencia de las hojas se produce la degradación de cloroplastos, que provoca la disminución en el contenido de clorofila (Hörtensteiner, 2006).

CONCLUSIONES

El análisis de las imágenes multiespectrales captadas con el sensor Parrot Sequoia mediante la interpretación del índice de NDVI, permitió evaluar su estado nutricional a diferentes dosificaciones de fertilización nitrogenada y en diferentes estados fenológicos del cultivo evaluado.

Demostrando que para la fase fenológica de espigamiento es posible mediante el índice NDVI encontrar diferencias entre los tratamientos empleados, mediante la respuesta espectral del cultivo, es decir que las dosificaciones empleadas ayudaron a tener una mejor respuesta del cultivo en su estado nutricional en contraste con el control. Para la fase fenológica de macollamiento y madurez no se logró encontrar diferencias entre los tratamientos aplicados, esto debido a que para la fase de macollamiento el cultivo aún no se encontraba con el máximo desarrollo de su biomasa y la medición del mismo en este estado fenológico no es capaz de verse reflejado en el índice NDVI, en cambio para la fase fenológica de madurez, no fue posible encontrar diferencias entre las dosificaciones de fertilizante aplicado debido a que la planta prácticamente se encontraba en periodo de senescencia, viéndose reflejado en el índice NDVI como una planta enferma o estresado para no es más que el estado fenológico en el que el cultivo se encontraba.

Puedo concluir que tanto el empleo del índice NDVI como la categorización del índice reflejaron resultados similares, demostrando que el empleo directo del índice NDVI o su categorización es viable para determinar la respuesta espectral del cultivo estudiado en los diferentes estados fenológicos del mismo.

RECOMENDACIONES

Realizar estudios en GSD muchos más bajos es decir cercanos a 1 cm/pix y demostrar si mediante estos es posible encontrar diferencias en la respuesta espectral en los estados fenológicos ya evaluados y de esta manera aprovechar de manera más óptima el potencial de la cámara Parrot Sequoia.

Utilizar otros medidores portátiles como el GreenSeeker y compararlo con las imágenes multiespectrales obtenidas con la cámara multiespectral Parrot Sequoia.

Emplear dosis de fertilización más altas, es decir una dosis de fertilización sobresaturada con el fin de comprobar si existe diferencia entre las dosificaciones empleadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Agroinversiones, S. (2010). *Manual de la cebada cervecera* (Vol. 41). Santiago.
- Amanollahi, J., Ramli, A., & Mohammad, P. (2012). Land surface temperature assessment in semi-arid residential area of Tehran, Iran using Landsat imagery. *World Applied Sciences Journal*, 20, 319-326. doi:10.5829/idosi.wasj.2012.20.02.3661
- Andreu , J., Betran, J., Delgado, I., Espada, J., Guitierrez, M., Iguacel, F., . . . Yaque, M. (2000). *Fertilizacion Nitrogenada Guia de actualizacion*. Aragón: Talleres Editoriales Cometa, S.A.
- Arnall, D., Tubaña, B., Holtz, S., Girma, K., & Raun, W. (2009). Relationship between nitrogen use efficiency and response index in winter wheat. *Plant Nutr*, 32, 502-515.
- Blackshaw, R., Hao, X., Harker, N., O'Donovan, T., Johnson, N., & Vera, L. (2011). Barley productivity response to polymer-coated urea in a no-till production system. *Agron*, 103, 1100-1105.
- Boero , J., Gomez, F., Prystupa , P., Urricariet, S., Ferraris, G., & Gutierrez, F. (2018). USO DE ÍNDICES ESPECTRALES COMO DIAGNOSTICO DE NUTRICIÓN NITROGENADA EN CEBADA CERVECERA. *Congreso Argentino de la ciencia del suelo* (págs. 442-447). Tucuman: INTA.
- Brikmam, R. (1999). *Guía para el manejo eficiente de la nutrición de las plantas*. Roma: ITA.
- Cobos, B., & Narváez, D. (2018). Fenología y producción de Rye grass (*Lolium multiflorum*) bajo sistema de labranza convencional y alternativa en la Granja de Irquis. *Titulo para la obtencion de Ingeniero Agronomo*. Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Cortez , M., & Baribay, R. (2016). *Temperatura*. Obtenido de Academia Bioinstrumental: <http://www.biblioteca.upibi.ipn.mx/Archivos/Material%20Didactico/Apuntes%20para%20la%20asignatura%20de%20instrumentaci%C3%B3n%20y%20control/cap2.pdf>

- Díaz García, J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Madrid.
- DIUC, P. (2016). *Proyecto Diuc: Evaluación de técnicas de manejo de suelos para producción de pastos en el valle del río Tarqui*. Cuenca-Ecuador.
- Dji. (01 de 2017). Mavic Pro Manual del usuario. *Mavic Pro*, 1.2, 6-11.
- Drones, G. (2021). *GUÍA DRONES*. Obtenido de Los drones de las cámaras de imagen multiespectrales en la agricultura producen grandes beneficios: <https://guiadrones.com/base-de-conocimiento/los-drones-de-las-camaras-de-imagen-multiespectrales-en-la-agricultura-producen-grandes-beneficios/>
- FAOSTAT. (2007). (*FAO Statistical Database*) . Obtenido de Production Statistics: <http://www.fao.org/inpho/inpho-post-harvest-compendium/cereales-y-granos/es/>
- Ferraris, G., Prystupa, F., Gutierrez, B., & Couretot, L. (2008). *Fertilización en cebada cervecera. Pautas de manejo para la obtención de altos rendimientos con calidad*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Garófalo, A. (2012). *Extracción de nutrientes por el cultivo de cebada*. Quito. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1136/1/T-UCE-0004-2.pdf>
- Garófalo, J., Falconí, E., Llangari, P., & Espinoza, M. (2010). *El cultivo de cebada: guía para la producción artesanal de semilla de calidad* (Vol. 390). Quito: Instituto nacional de investigaciones agropecuarias.
- Goñi Labat, M. (2018). RELACIÓN ENTRE INDICES DE VEGETACIÓN DERIVADOS DE IMÁGENES SENTINEL 2A CON DOSIS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN CEREALES DE INVIERNO EN LA CUENCA DE PAMPLONA (NAVARRA). *MÁSTER EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN*. Universidad Pública de Navarra ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRONOMOS, Navarra. Obtenido de <https://academica->

e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/31194/TFM_GOÑI_LABAT_MARTA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Guitierrez, S., Hernandez, L., Orozco, R., Diaz, O., & Delgado, I. (2 de Mayo-Agosto de 2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *RIELAC, XXXIX*, 79-91. Obtenido de file:///D:/Desktop/ISMAEL/TESIS%20CORRECCION%20ULTIMA%20APROBACION/Bibliografia/uso%20camarra%20parrot%20sequoia%20en%202%20programas%20distintos%20para%20generar%20el%20indices%20espectrales.pdf

Guzman, A., Gusqui, R., Morán , N., & Inoue, H. (2015). *Manejo Integrado del Cultivo de Cebada y Trigo (Hordeum vulgare) y (Triticum aestivum)* (Vol. Guía Técnica 1). Riobamba, Ecuador: GADPCH. Obtenido de http://www.congope.gob.ec/wp-content/uploads/2017/10/Cultivo_de_cebada_manual.pdf

Hernandez , A., Bojorquez , J., Morell, F., Cabrera, A., Ascanio, M., Garcia , J., . . . Nájera O. (2010). *Fundamentos de la estructura de suelos tropicales*. Mexico: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA).

Hörtensteiner, S. (2006). Chlorophyll degradation during senescence. *Plant Biology*, 57, 55-77.

Huber , S., Kncubuhler, M., Psomas, A., Itten, K., & Zimmermann, N. (2008). Estimating foliar biochemistry from hyperspectral data in mixed forest canopy. *Forest Ecology and management*.

IGVSB, I. (28 de Julio de 2000). Ley de Geografía, Cartografía y Catastro Nacional. *Gaceta Oficial*, 37.002, 32. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/299530511_ESTABLECIMIENTO_DE_PUNTOS_DE_CONTROL_TERRESTRE_PARA_LA_CORRECCION_PLANIALTIMETRICA_DE_IMAGENES_TOMADAS_POR_DRONES_ESTABLISHMENT_OF_GROUND_CONTROL_POINTS_PLANIALTIMETRIC_CORRECTION_FOR_IMAGE_TAKEN_BY_U

ING, I. (22 de Julio de 2015). *Proyecto de normas técnicas de levantamientos geodésico*.
Obtenido de Dirección de geodesia: <https://books.google.co.ve/books>

INIAP. (2009). *Recomendaciones de fertilización*. Quito, Ecuador: INIAP.

INIAP. (2009). Recomendaciones de fertilización. *INIAP*, 82.

Juarez, A. (2008). *Radiación Solar*. Obtenido de
<http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/cordoba/1324/trabajo/index.html>

Lopez , L., Beltran , J., Ramos , A., Lopez , H., Lopez, P., Bermeo , J., . . . Perez, J. (2009).
*Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España: Parte II -
Abonado de los principales cultivos en España*. Madrid: Editorial V.A. Impresores,
S.A.

Lopez de Sabando , M., & Zubillaga, M. (2012). INDICES ESPECTRALES SEGÚN
FERTILIZACION NITROGENADA Y ZONAS DE PRODUCTIVIDAD DE
TRIGO. *INTA*, 1-7. Obtenido de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-
indices_espectrales_zona_de_productividad_de_tri.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-indices_espectrales_zona_de_productividad_de_tri.pdf)

Manosalvas , S. (2019). "Diseño e implementación de un sensor multiespectral para un
vehículo aéreo no tripulado que ayude a la agricultura de precisión". *Trabajo de
titulación previo a la obtención del título de ingeniero en electrónica y
telecomunicaciones*. Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí.

Martínez, E., & Yanchatipán, L. (2020). Estudio de la variabilidad espectral del chocho
(*Lupinus mutabilis sweet*), mediante el uso de sensores activos y pasivos por efecto
de la adición de quelatos y nanofertilizantes. *Trabajo de titulación, previo a la
obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente*. ESPE-Universidad
de las Fuerzas Armadas, Sangolquí. Obtenido de
[http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/22684/T-ESPE-
043940.PDF?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/22684/T-ESPE-043940.PDF?sequence=1&isAllowed=y)

Marwaha Kraetzig, N. (01 de 07 de 2020). *https://up42.com/*. Obtenido de 5 cosas que debe saber sobre el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada): <https://up42.com/blog/tech/5-things-to-know-about-ndvi>

Maxwell , T. (07 de Julio de 2022). *Sistema Trimble R8 GNSS*. Obtenido de <https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2019-03/Datasheet%20-%20Trimble%20R8s%20GNSS%20System%20-%20Spanish%20-%20Screen.pdf>

Meteoblue. (2006). *Humedad*. Obtenido de <https://content.meteoblue.com/especificaciones/variables-meteorologicas/humedad>

Moreno, G., Guillen , M., Casterad , M., & Quilez , D. (2013). USO DE IMÁGENES AÉREAS MULTIESPECTRALES PARA ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO EN CULTIVO DE ARROZ. *XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET)*. Madrid.

Muñoz, P. (2013). *Apuntes de teledetecion: Indices de vegetacion* . Chile: ciren.

Oropesa, J. (2012). Efecto de la fertilización nitrogenada sobre rendimiento y calidad en trigo y cebada. *Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria*. Universidad catolica de Argentina, Buenos Aires, Argentina. Recuperado el 08 de Junio de 2022, de <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/efecto-fertilizacion-nitrogenada.pdf>

Parrot, S. (22 de Junio de 2018). *Parrot*. Recuperado el 19 de Febrero de 2021, de Parrot Sequoia+: <https://www.parrot.com/es/casos-de-uso/anafi-usa-inspeccion>

Perdomo, C., Caicedo, J., Nuñez, N., Machado , D., Garcia , J., & Pineda , M. (2015). *ESTABLECIMIENTO DE PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE PARA LA CORRECCIÓN PLANIALTIMETRICA DE IMÁGENES TOMADAS POR DRONES*. Venezuela: SIGPER CONSULTORES, C.A.

Piura. (2006). *Precipitacion*. Obtenido de Insuficiencia Cardiaca Cronica: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_136_147_89_1257.p

- PLASTER, E. (2000). *La ciencia del suelo y su manejo*. Madrid, España: Thompson.
- Polanía , D. (2017). Respuestas espectrales a la fertilización con nitrógeno en el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.). *Tesis para titulo de Magister en Geomática*. Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62002>
- Rendon , R., & Sedeghiam , S. (2018). Aplicación de Indices espectrales para identificar necesidades de fertilización nitrogenada en café. *Cinecafé*, 69, 7-15. Obtenido de <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc069%2801%29007-015.pdf>
- Reussi Calvo, N., Echeverría, H., Barbieri, P., & Sainz Rozas, H. (2006). Nitrógeno y azufre en trigo: ¿Rendimiento y proteína? *XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, (págs. 19–22). Salta-Jujuy.
- Rivadeneira, M. (1995). *Inventario tecnologico del programa de cereales*. Quito: INIAP.
- Ross, F., & Lopez de Sabando, M. (2021). . Diagnóstico de Nitrógeno en Cebada y Trigo NDVI y COBERTURA. *INTA*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/352903460_Ross_F_y_Lopez_de_Sabando_2016_Diagnostico_de_Nitrogeno_en_Cebada_y_Trigo_NDVI_y_COBERTURA_INTA
- Sabando Lopez , M., & Ross, F. (2015). DIAGNÓSTICO DE NITRÓGENO EN CEBADA Y TRIGO: NDVI Y COBERTURA. *INTA*, 1-3. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_-14-diagnostico_de_nitrogeno_en_cebada_y_trigo_ndvi_y_cobertura_-_ross_f.pdf
- Samborski , S., Tremblay , N., & Fallon, E. (2009). Strategies to make use of plant sensor-based diagnostic information nitrogen recommendations. *Agronomic Journal*, 101, 800-816.
- Saxena , L., & Armstrong, L. (2014). *A survey of image processing techniques for agriculture*. Obtenido de ECU Publications Post: <https://ro.ecu.edu.au/ecuworkspost2013/854/>

- SENPLADES. (2009). *Plan Nacional para el Buen Vivi*. Quito.
- Sun, D., & Gong, X. (2010). Barley Germplasm and utilization in: Genetics and improvement of barley malt quality advanced topics in science and technology in China. 18-62.
- Toribio, G. (24 de octubre de 2019). *Curso Teledetección*. Obtenido de NDVI, ¿qué es y para qué sirve?: <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- Toribio, G. (25 de Octubre de 2019). *Cursos Teledetección* . Obtenido de NDVI, ¿qué es y para qué sirve?: <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- Torrez, S., Peña, J., Castro, M., & López, G. (2013). *Multi-temporal mapping of vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV*.
- Valdés, Riveros, & Arancibia. (2012). *Radiación Solar*. Obtenido de La Radiación Solar.
- Vargas, N. (2019). Nota técnica sobre el procesamiento fotogramétrico de imágenes multiespectrales captadas con drones usando la cámara Parrot Sequoia y el programa Agisoft PhotoScan Pro. *ResearchGate*, 6-7. doi:10.13140/RG.2.2.11931.92965
- Verhulst, N., Govaerts, B., & Fuentes Ponce, M. (2010). *Sensor portátil GreenSeekerTM para la medición del índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI): Una herramienta para la evaluación integral de las prácticas agronómicas*. México: CIMMYT.
- Vivar , H., & McNab, A. (2001). Breeding in the new millenium. (CIMMYT, Ed.) *Mexico DF*, 77-79.

ANEXOS

Anexo 1 Delimitación y preparación del espacio físico utilizado para llevar acabo la experimentación.



Anexo 2 Toma de muestra de suelo y siembra general del cultivo con tractor.



Anexo 3 Cuantificación de fertilizante a emplear por tratamiento y aplicación de fertilizante.



Anexo 4 Análisis de suelo de la parcela experimental.

	ESTACION EXPERIMENTAL DEL AUSTRO LABORATORIO DE MANEJO DE SUELOS Y AGUAS km 12 1/2 vía El Descenso - BULLCAY - Gualaquero - www@iniap.gob.ec Azuay - Ecuador TeleFax: (07) 2171161	

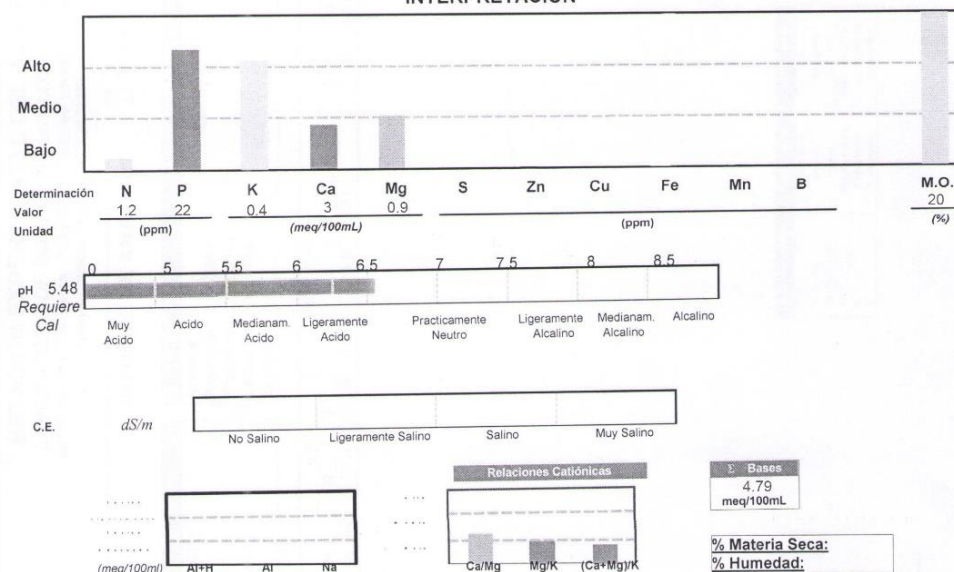
REPORTE DE ANALISIS DE SUELOS

DATOS DEL PROPIETARIO		
Nombre : ISMAEL ROBLES	Teléfono : N/E	
Dirección :	e-mail : N/E	
Ciudad : CUENCA		

DATOS DE LA PROPIEDAD		
Nombre :	Parroquia : VICTORIA DEL PORTETE	
Provincia : AZUAY	Ubicación : IRQUIS	
Cantón : CUENCA	Latitud :	Longitud :

DATOS DE LA MUESTRA			
No. Laboratorio : 6420	Responsable Muestreo : Cliente	Factura No. : 0	
Identificación : PROP. U. CUENCA	Fecha Muestreo : 29/07/2021	Fecha Análisis : 13/08/2021	
Cultivo Actual : POTRERO	Fecha Ingreso : 11/08/2021	Fecha Emisión : 16/08/2021	

INTERPRETACION



Determinación	Metodología	Extractante
N, P	Colorimetría	Olsen
K, Ca, Mg	Absorción	Modificado pH 8.5
Zn, Cu, Fe, Mn	Atómica	
S	Turbidimetría	Fosfato de Ca
B	Colorimetría	Monobásico
Cl	Volumetría	Pasta Saturada
M.O.	Oxidación	No aplica
	Via Humeda	

Determinación	Metodología	Extractante
pH	Potenciometría	Suelo: Agua (1:2.5)
C.E.	Conductometría	Pasta Saturada
Textura	Bouyoucos	No Aplica
Al	Volumetría	K, Cl, 1 N
Al + H	Absorción	Pasta Saturada
Na	Atómica	
E Bases	Olsen Modificado	pH 8.5

Niveles de Referencia Optimos											
N	20 - 40	S	10 - 20	P	0.5 - 1.0	Na	0.5 - 1.0	Ca/Mg	2 - 8	Mg/K	2.5 - 10.0
P	10 - 20	Zn	4 - 8	Cl	0 - 0	Ca/Mg	2 - 8	Mg/K	2.5 - 10.0	(Ca+Mg)/K	12.5 - 50.0
K	0.2 - 0.4	Cu	1 - 10	M.O.	3 - 5						
Ca	4 - 8	Fe	20 - 40	Al+H	0.5 - 1.5						
Mg	1 - 3	Mn	5 - 10	Al	0.3 - 1.0						



Responsable laboratorio



ESTACION EXPERIMENTAL CHUQUIPATA
Laboratorio de Suelos y Aguas

N/E: No Entrega
Los resultados emitidos en este informe, corresponden únicamente a la(s) muestra(s) sometida(s) al ensayo.
Se prohíbe la reproducción parcial, si se va a fotocopiar que sea de todo el documento original.

Fecha Impresión : 16/08/2021

Anexo 5 Plan de fertilización nitrogenada basado en análisis de suelo por tratamiento.

Descripción:	Granja Irquis tesis		Propiedades Físicas			
Fecha:	29/07/2021	Densidad aparente (g/cm³)	0.59	Volumen suelo(m³):	405	
Tipo extractante:	Olsen Modificado pH 8	Profundidad (m):	0.2	Peso suelo(kg):	238950	
Superficie (ha):	0.2	Superficie (m²)	2025			
Propiedades Químicas						
Unidad		ppm		meq/100mL		ppm
Determinación	pH	N	P	K	Ca	Mg
Valor	6.5	1.2	22.1	0.41	3.4	0.98
Interpretación	LAc	B	A	A	B	B
DISPONIBILIDAD ELEMENTOS (Kg/ha)						
Valor		1.416	26.078	188.682	802.4	144.55
Unidad		N	P2O5	K2O	CaO	MgO
Valor		1.42	59.72	226.42	1123.36	245.735

Factores conversión	
P a P2O5	2.29
K a K2O	1.2
Ca a CaO	1.4
Mg a MgO	1.7

PLAN DE FERTILIZACIÓN				FUENTES DE FERTILIZANTE					
Unidad experimental				Fertilizantes	N	P2O5	K2O	CaO	MgO
Área unid. Exp.	100 m²			Urea	46	0	0	0	0
Núm unid exp.	16			Fosfato monoamónico (MAP)	11	52	0	0	0
Número rep.	4			Sulpomag	0	22	0	0	17
Demanda del cultivo									
	Baja	Media	Alta						
N	20	60	80 kg/ha						
P	17	26	39 kg/ha						
K	17	25	33 kg/ha						
S	10	20	30 kg/ha						
Mg	3.3	3.3	3.3 kg/ha						
Disponibilidad en el suelo				Dosis de fertilización					
N	1.42 kg/ha			N	40.4	127	171 kg/ha		
P	59.72 kg/ha								
K	226.42 kg/ha								
Mg	245.735 kg/ha								
Requerimiento neto									
N	18.58	58.58	78.58						
P	-42.72	-33.72	-20.72	No aplicar fertilización					
K	-209.42	-201.42	-193.42	No aplicar fertilización					
Mg	-235.74	-225.74	-215.74	No aplicar fertilización					

Plan fertilización							
Tratamientos	repeticiones			Control		Media	
0 kg/ha			10000 m²	0 kg/ha	10000 m²	127 kg/ha	
20 kg/ha			400 m²	0 kg/ha	400 m²	5.09426087 kg/ha	
60 kg/ha				0 lbs		11.2309094 lbs	
80 kg/ha							
			10000 m²	Baja	40.4 kg/ha	171 kg/ha	
			400 m²		1.616 kg/ha	6.8333913 kg/ha	
					3.56266592 lbs	15.0650311 lbs	
Inicio							
mitad							
Kilogramos totales	13.5	6.8 kg					
Libras totales	29.9	14.9 lbs					

Anexo 6 Parámetros de vuelo dado por el software mission planner

