



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster en Ingeniería Agronómica

**“Determinación de la cantidad de nitrógeno y clorofila
en el cultivo de alfalfa mediante teledetección con
drones y comparación con otras técnicas”**

ALUMNA: INÉS GÓMEZ DELGADO

TUTOR: LUIS MANUEL NAVAS GRACIA

COTUTOR: JOSÉ LUIS MARCOS ROBLES

DIRECTOR EXTERNO: OUIAM FATIHA BOUKHARTA

FECHA: Febrero del 2025

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN.....	1
2. ANTECEDENTES Y REVISIÓN SISTEMÁTICA.....	3
2.1. Cultivo de la alfalfa.....	4
2.1.1. Introducción a la alfalfa.....	4
2.1.2. Cultivo de la alfalfa.....	5
2.2. Sector de producción de la alfalfa en España.....	7
2.3. Nitrógeno y clorofila en planta.....	10
2.3.1. Nitrógeno en planta.....	10
2.3.2. Clorofila en planta.....	10
2.4. Determinación de nitrógeno y clorofila en planta.....	10
2.4.1. Medición Directa mediante SPAD.....	10
2.4.2. Teledetección con drones.....	11
3. OBJETIVOS.....	12
4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	14
4.1. Revisión sistemática.....	15
4.1.1. Búsqueda de artículos.....	15
4.1.2. Cribado de artículos.....	16
4.1.3. Codificación de artículos.....	16
4.1.4. Análisis de los datos.....	17
4.2. Parcela de estudio.....	18
4.2.1. Descripción de la parcela de estudio.....	18
4.2.2. Estudio climático.....	20
4.3. Determinación de Nitrógeno y Clorofila.....	23
4.3.1. Medición Directa mediante SPAD.....	23
4.3.2. Teledetección con drones.....	25
4.3.3. Análisis estadístico.....	27
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
5.1. Resultados de la revisión sistemática.....	29
5.1.1. Atendiendo a su distribución.....	29
5.1.2. Atendiendo a los años de publicación.....	30
5.1.3. Atendiendo a la metodología empleada.....	30
5.1.4. Atendiendo a los resultados obtenidos.....	31
5.1.5. Atendiendo a las limitaciones encontradas.....	32
5.1.6. Atendiendo a las conclusiones de los estudios.....	32

5.2. Resultados con instrumentos de medida en campo	33
5.2.1. Resultados con SPAD	33
5.2.2. Resultados con imágenes de dron.....	33
5.3. Resultados de laboratorio.....	34
5.4. Correlación entre los índices de vegetación y el nitrógeno y la clorofila	34
5.4.1. Correlación con datos de instrumentos de campo	34
5.4.2. Correlación con datos obtenidos del laboratorio	39
6. CONCLUSIONES.	40
7. ANEXOS.	42
ANEXO I. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ESTADÍSTICAS.....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estados de madurez de la alfalfa en base al desarrollo morfológico de tallos. Fuente: Spada et al., 2007.	5
Tabla 2. Principales enfermedades que afectan al cultivo de la alfalfa. Fuente: Hijano & Navarro, 1995.	6
Tabla 3. Principales plagas que afectan al cultivo de la alfalfa. Fuente: Baixauli, 2021.	6
Tabla 4. Superficie en hectáreas dedicada a la producción de los distintos cultivos forrajeros en España. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.	7
Tabla 5. Rendimientos en verde de la alfalfa en kilos por hectárea tanto en secano como en regadío en España. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.	8
Tabla 6. Diferentes combinaciones de búsquedas para la obtención de artículos. Fuente: Elaboración propia.	15
Tabla 7. Niveles de codificación de los artículos. Fuente: Elaboración propia.	16
Tabla 8. Datos de la parcela de estudio. Fuente: SIGPAC.	19
Tabla 9. Cuadro resumen de las principales variables climáticas entre los años 2003 y 2023 en Viñalta (Palencia). Fuente: Inforiego, Estación Meteorológica de Villamuriel de Cerrato.	22
Tabla 10. Ejemplo de los datos tomados en campo por el SPAD en dos puntos diferentes en la fecha del 16/05/2024. Fuente: Elaboración propia.	33
Tabla 11. Ejemplo de los resultados de los índices de vegetación en el segundo muestreo (23/05/24) obtenidos mediante Pix4Dmapper.	33
Tabla 12. Análisis de laboratorio de la proteína bruta sobre materia seca del cultivo de alfalfa en la última fecha de muestreo. Fuente: ITAGRA.CT.	34
Tabla 13. Resumen del resultado final de las pruebas de normalidad realizadas con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 14. Resultados relevantes de la prueba estadística de Pearson con XLSTAT del cultivo de alfalfa de la parcela objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 15. Resultados de la prueba estadística de Spearman con XLSTAT del cultivo de alfalfa de la parcela objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia.	38
Tabla 16. Resultados de la prueba estadística de Regresión No Paramétrica para las diferentes variables en todas las fechas del cultivo de alfalfa con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia. ...	38
Tabla 17. Pruebas de normalidad con XLSTAT del nitrógeno obtenido del análisis de laboratorio de ITAGRA.CT. Fuente: Elaboración propia.	39
Tabla 18. Resultados de las diferentes pruebas estadísticas del nitrógeno obtenido del análisis de laboratorio de ITAGRA.CT con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia.	39
Tabla 19. Pruebas de normalidad con XLSTAT de las variables a tener en cuenta de la parte alta del cultivo de alfalfa. Fuente: Elaboración propia.	43
Tabla 20. Pruebas de normalidad con XLSTAT de las variables a tener en cuenta de la parte baja del cultivo de alfalfa. Fuente: Elaboración propia.	43

Tabla 21. Resultados de la prueba estadística de Pearson para las diferentes variables de los muestreos del cultivo de alfalfa con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia..... 44

Tabla 22. Resultados de la prueba estadística de Spearman para las diferentes variables de los muestreos del cultivo de alfalfa con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia..... 44

Tabla 23. Resultados de la prueba estadística de Regresión No Paramétrica para las diferentes variables de los muestreos del cultivo de alfalfa con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia. 45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cultivo de la alfalfa. Fuente: Cherlinka, 2024.	4
Figura 2. Hojas trifoliadas de la alfalfa. Fuente: ANSO, 2011.....	4
Figura 3. Porcentaje de superficie destinado a los distintos tipos de cultivos forrajeros de la familia de las leguminosas en España. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.....	7
Figura 4. Destinos de la producción de alfalfa expresados en porcentaje en España. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.....	8
Figura 5. Mapa de la superficie cosechada de alfalfa por Comunidades Autónomas en España. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.....	9
Figura 6. Evolución de la superficie cultivada de alfalfa en miles de hectáreas en España desde el año 2012 hasta el 2022. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.	9
Figura 7. Revisión sistemática paso a paso. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 8. Localización de la parcela de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	18
Figura 9. Recintos de la parcela objeto de estudio en Viñalta (Palencia). Escala: 1:4000. Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS.	19
Figura 10. Recinto 1 de la parcela de ensayo de Viñalta (Palencia). Escala: 1:4000. Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS.	20
Figura 11. Cuadro resumen de temperaturas de Viñalta (Palencia) entre el año 2003 y 2023. Fuente: Inforiego, Estación Meteorológica de Villamuriel de Cerrato.	20
Figura 12. Evolución de las precipitaciones medias mensuales en el período de años 2003-2023 en Viñalta (Palencia). Fuente: Inforiego, Estación Meteorológica de Villamuriel de Cerrato.	21
Figura 13. Rosa de los vientos de la estación meteorológica de Viñalta (Palencia).	21
Figura 14. Diagrama ombrotérmico de Gaussen de Viñalta (Palencia) para el período de años 2003-2023.....	23
Figura 15. Medida directa mediante SPAD en el cultivo de alfalfa de la parcela estudio de Viñalta. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 16. Ubicación de los puntos de muestreo en la parcela objeto de estudio en Viñalta. Escala: 1: 4000. Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS.....	24
Figura 17. Dron DJI Mavic 3M en los muestreos de la parcela de Viñalta.	25
Figura 18. Distribución en el mundo de los artículos finales. Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 19. Distribución por continentes de los artículos finales. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 20. Distribución de los artículos finales en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 21. Diversidad de metodologías de los diferentes artículos seleccionados. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 22. Diversidad de los resultados obtenidos de los artículos seleccionados en la revisión sistemática. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 23. Evolución del nitrógeno y la clorofila medido mediante el SPAD en la parte alta del cultivo de la alfalfa a lo largo de su ciclo. Fuente: Elaboración propia.	35

Figura 24. Evolución del nitrógeno y la clorofila medido mediante el SPAD en la parte baja del cultivo de la alfalfa a lo largo de su ciclo. Fuente: Elaboración propia. 35

Figura 25. Evolución de los índices de vegetación obtenidos a través de la teledetección con drones en el cultivo de la alfalfa a lo largo de su ciclo. Fuente: Elaboración propia..... 36

1.RESUMEN.

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) constituye uno de los cultivos forrajeros más relevantes en España, siendo especialmente destacado en la región de Castilla y León. Esta leguminosa requiere una especial atención en cuanto a sus niveles de nitrógeno y clorofila, elementos fundamentales tanto para la síntesis proteica como para el proceso fotosintético, que determinan en gran medida el desarrollo y la productividad de la planta. La presente investigación evalúa la eficacia de la teledetección mediante drones con sensores multispectrales para estimar el contenido de nitrógeno y clorofila en cultivos de alfalfa, comparándola con métodos tradicionales de medición. El estudio se realizó en una parcela de alfalfa situada en Viñalta (Palencia) combinando tres metodologías diferentes: teledetección con dron frente a mediciones con SPAD y análisis de laboratorio. El muestreo en campo se efectuó en diez puntos aleatorios en cuatro momentos del desarrollo fenológico del cultivo, analizando dos plantas por punto y dos hojas por planta (una superior y una inferior). Los vuelos con dron se realizaron simultáneamente a cada muestreo, generando tres índices de vegetación (NDVI, GNDVI y NDRE) mediante procesamiento Pix4Dmapper. Adicionalmente, se realizó un análisis de laboratorio para determinar el porcentaje de proteína bruta y nitrógeno en planta para validar la precisión de las mediciones remotas. La revisión bibliográfica sistemática en Web of Science y Scopus proporcionó 55 artículos relevantes partiendo de un total de 22.937 y revelando escasa literatura específica sobre alfalfa, pero abundante información metodológica. Los resultados indican que la efectividad de los índices de vegetación varía según la fase fenológica del cultivo, siendo la fase de floración la que revela los resultados más representativos. Se observaron diferencias significativas entre los niveles de nutrientes en la parte superior e inferior de las plantas, siendo mayor la concentración en las hojas superiores debido a su mejor exposición lumínica y mayor capacidad de captación. Este estudio proporciona la base fundamental para futuros estudios científicos relacionados con la estimación de nitrógeno y clorofila mediante teledetección con drones en el cultivo de la alfalfa.

2.ANTECEDENTES Y REVISIÓN SISTEMÁTICA.

2.1. Cultivo de la alfalfa

2.1.1. Introducción a la alfalfa

2.1.1.1. Características botánicas

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una especie forrajera perteneciente a la familia de las leguminosas que se utiliza ampliamente en alimentación animal originaria del suroeste de Asia. (Barnes, 2015).

Se trata de una planta perenne herbácea con una altura de entre 10 y 80 cm (Figura 1). Se caracteriza por sus hojas trifoliadas (Figura 2), compuestas por folíolos obovados con márgenes aserrados. Sus flores presentan una corola de color violeta o amarilla y se agrupan en racimos. Las semillas se alojan en el interior de unas vainas arrolladas en espiral, con 2-3 espiras (Rodríguez et al., 2022).



Figura 1. Cultivo de la alfalfa. Fuente: Cherlinka, 2024.



Figura 2. Hojas trifoliadas de la alfalfa. Fuente: ANSO, 2011.

2.1.1.2. Características nutritivas

La alfalfa es una leguminosa muy valorada en alimentación animal debido a que es capaz de sintetizar el nitrógeno atmosférico y aportar una gran riqueza de fibra y proteína de calidad. Presenta un valor energético alto y es una fuente de minerales como el potasio, el magnesio o el azufre. Los dos destinos más comunes de este forraje son para heno que implica la recolección y secado al sol de este cultivo conservando sus propiedades nutricionales y su sabor natural y para deshidratación, proceso por el que la alfalfa es picada y secada para ser prensada posteriormente en forma de alpacas (Ralda, 2016).

2.1.1.3. Fenología del cultivo

La fenología de la alfalfa, fundamental para su manejo agronómico, tradicionalmente se clasificaba en cuatro categorías básicas: vegetativo, botón floral, floración y fructificación. Sin embargo, esta clasificación simplificada no consideraba adecuadamente los cambios en la calidad del forraje influenciados por el ambiente y la fisiología de la planta (Rodríguez et al., 2022).

Por ese motivo, Kalu y Fick en 1981 desarrollaron un sistema más detallado de clasificación (Tabla 1). Este nuevo sistema comprende 4 fases vegetativas dentro de las que se encuentran 10 estadios de desarrollo (del 0 al 9) que describen con precisión la evolución de la planta, desde el estado vegetativo temprano con tallos menores a 15 cm (estadio 0), pasando por el desarrollo de botones florales (estadios 3-4), la floración (estadios 5-6), hasta la producción de semillas con vainas maduras y secas (estadio 9). Esta clasificación más detallada permite un manejo más preciso del cultivo, una mejor determinación del momento óptimo de corte y una comprensión más profunda de los cambios en la calidad del forraje, considerando tanto aspectos morfológicos como fisiológicos de la planta (Rodríguez et al., 2022).

Tabla 1. Estados de madurez de la alfalfa en base al desarrollo morfológico de tallos. Fuente: Spada et al., 2007.

Fase	Estadio de Madurez	Denominación	Definición Morfológica
Vegetativa	0	Vegetativo temprano	Ausencia de yemas y hojas axilares
	1	Vegetativo medio	Presencia de primeras hojas originadas de yemas axilares
	2	Vegetativo tardío	Presencia de ramificaciones axilares
Botón Floral	3	Botón temprano	1 a 2 nudos con botones florales
	4	Botón tardío	Más de 3 nudos con botones florales
Floración	5	Floración temprana	1 nudo con una flor abierta
	6	Floración tardía	Más de 2 nudos con una flor abierta
Fructificación	7	Fructificación temprana	1 a 3 nudos con vainas verdes
	8	Fructificación tardía	Más de 4 nudos con vainas verdes
	9	Semillas maduras	Nudos con vainas marrones

2.1.2. Cultivo de la alfalfa

2.1.2.1. Condiciones ambientales

La alfalfa es un cultivo altamente influenciado por factores ambientales. Su temperatura de germinación óptima se encuentra entre 28-30°C, siendo letales las temperaturas superiores a 38°C. El pH es otro factor crítico, siendo el óptimo 7,2, por lo que se recomiendan enmiendas calizas (que contienen calcio y magnesio en forma de óxidos, hidróxidos o carbonatos) cuando baja de 6,8, especialmente en suelos ácidos. La planta es muy sensible a la salinidad, que puede causar palidez en los tejidos, reducción del tamaño de las hojas y detención del crecimiento. Además, el cultivo requiere suelos profundos (más de 60 cm) y bien drenados (Cherlinka, 2024).

2.1.2.2. Técnicas agronómicas

La preparación del terreno incluye subsolado y gradeos sucesivos, realizando el abonado de fondo y encalado dos meses antes de la siembra fundamental para el desarrollo de la planta y la formación de nódulos. La siembra suele realizarse en otoño con una dosis de siembra variable entre 6-8 kg/ha y 12-16 kg/ha. La profundidad de siembra puede ser de 1,25 cm en terrenos arcillosos y de 2,5 cm en terrenos arenosos (Jareña, 2023).

En cuanto al nitrógeno, es necesario aportar unos 20 kg/ha, asegurando su disponibilidad en el suelo hasta que se formen los nódulos bacterianos que facilitarán su absorción natural. El fósforo, que se aplica en profundidad en cantidades de 150-200 kg/ha, garantiza un adecuado desarrollo del sistema radicular. Por último, el potasio, elemento responsable de la resistencia al frío y la

2. ANTECEDENTES Y REVISIÓN SISTEMÁTICA.

sequía, requiere una aplicación en dos fases: un abonado de fondo de 200-300 kg/ha y una restitución anual de 100-200 kg/ha (Jareña, 2023).

También son importantes las concentraciones de azufre, boro y molibdeno que en ausencia pueden provocar detenciones en el crecimiento o reducir la actividad de las bacterias fijadoras de nitrógeno. El cultivo también se puede beneficiar de abonos orgánicos como estiércol, purines y rastrojos, que mejoran la fertilidad y las condiciones físicas del suelo (Jareña, 2023).

La alfalfa presenta altos requerimientos de agua debido a tres factores principales: su extenso período vegetativo, su amplio sistema radicular y su abundante cobertura foliar. La cantidad de agua necesaria por temporada de crecimiento oscila entre 500 y 1.170 mm, aunque esta cifra depende de las condiciones ambientales específicas del lugar de cultivo (Cherlinka, 2024).

2.1.2.3. Plagas y enfermedades

Las plagas y enfermedades constituyen una seria amenaza para el cultivo de alfalfa, pudiendo afectar significativamente tanto el desarrollo de la planta como la producción y calidad del forraje. A continuación, se describen las principales patologías que afectan a este cultivo.

Las principales enfermedades que afectan a la alfalfa se encuentran resumidas en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales enfermedades que afectan al cultivo de la alfalfa. Fuente: Hijano & Navarro, 1995.

Nombre común	Nombre científico	Síntomas
Roya	<i>Uromyces straitus</i>	Aparición de pústulas circulares de color castaño-rojizo en hojas y en tallos.
Fusariosis	<i>Fusarium oxysporum</i>	Marchitamiento de tallos, pérdida de color y turgencia en las hojas durante el día y coloración pardo-rojiza en la raíz principal y en los vasos de conducción.
Gomosis o podredumbre del cuello	<i>Phytophthora megasperma</i>	Amarilleamiento y marchitamiento de la planta que provoca una reducción de la vida útil del cultivo.
Podredumbre de la raíz	<i>Sclerotinia trifoliorum</i>	Coloración marrón-amarillenta que posteriormente evoluciona a una podredumbre blanda y pardo-oscura en coronas y base de los tallos.

La rotación de cultivos es la clave para evitar la propagación de estos patógenos y el desarrollo de estas enfermedades. Se recomienda una rotación con cereales y gramíneas forrajeras con un intervalo de al menos 2 años (Cherlinka, 2024).

Respecto a las plagas que destacan en este cultivo, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Principales plagas que afectan al cultivo de la alfalfa. Fuente: Baixauli, 2021.

Nombre común	Nombre científico	Síntomas
Cuca de la alfalfa	<i>Colaspidea atrum</i>	Las larvas causan daños a las hojas de la alfalfa, alimentándose de ellas y dejando solo los nervios de los brotes más tiernos.
Apion	<i>Apion apricans</i>	Las hembras depositan huevos en las yemas terminales de la alfalfa, y sus estadios posteriores provocan daños en las flores y brotes tiernos del cultivo.
Gusano verde	<i>Hypera prosticus</i>	Las larvas, conocidas como "gusano verde", destruyen los extremos de los brotes, siendo las principales causantes del daño.
Pulgones	<i>Aphis craccivora, Aphis fabae, Acyrthosiphon pisum, Myzus persicae...</i>	Forman colonias que provocan que las hojas se vuelvan pegajosas por la secreción de melaza y se abarquillen, adquiriendo un color verde grisáceo provocando un marchitamiento e incluso la muerte de las plantas afectadas.

2.2. Sector de producción de la alfalfa en España

La alfalfa es uno de los cultivos forrajeros más importantes a nivel mundial (Martín, 2021), destacando por su alto valor nutricional y amplia adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas (Annicchiarico, P. et al., 2011). En España, la producción de alfalfa juega un papel fundamental en el sistema agropecuario, aportando materias primas esenciales para la alimentación del ganado y contribuyendo a la seguridad alimentaria del país (Jabri, C. et al., 2021). En este apartado se pretende analizar en profundidad el sector de producción de alfalfa en España, examinando los principales aspectos que configuran su dinámica y evolución.

La alfalfa es un cultivo forrajero dentro de la familia de las leguminosas. En la Tabla 4 se muestra la superficie expresada en hectáreas correspondiente a los distintos tipos de cultivos forrajeros cosechados o pastados tanto en seco como en regadío.

Tabla 4. Superficie en hectáreas dedicada a la producción de los distintos cultivos forrajeros en España. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.

CULTIVOS FORRAJEROS	SUPERFICIE (ha)				Total
	Cosechada		Pastada solamente		
	Secano	Regadío	Secano	Regadío	
GRAMÍNEAS	418.733	86.072	38.389	2.848	546.042
LEGUMINOSAS	272.616	152.856	21.177	510	447.159
ALFALFA	87.666	133.123	6.125	295	227.209
RAÍCES Y TUBÉRCULOS	1.942	1.143	0	0	3.085
PRADERAS POLIFITAS	209.889	13.974	167.472	10.033	401.368
FORRAJERAS VARIAS	7.107	1.523	3.452	1.777	13.859
TOTAL CULTIVOS FORRAJEROS	910.287	255.568	230.490	15.168	1.411.513

Como se puede observar en la tabla anterior, la familia de las gramíneas es la que mayor porcentaje representa de la superficie destinada al cultivo de los cultivos forrajeros seguida muy de cerca por la de las leguminosas. Dentro de esta última, destaca la alfalfa suponiendo un 51% de la superficie total de leguminosas. En la Figura 3 se encuentra representado el porcentaje correspondiente a cada cultivo que se encuentra dentro de la familia de las leguminosas. Los porcentajes no representados se consideran despreciables.

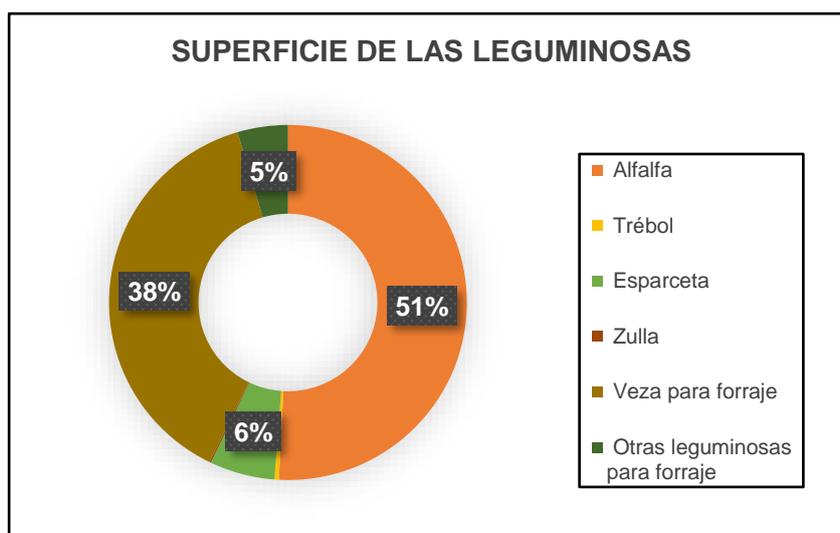


Figura 3. Porcentaje de superficie destinado a los distintos tipos de cultivos forrajeros de la familia de las leguminosas en España. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.

2. ANTECEDENTES Y REVISIÓN SISTEMÁTICA.

En la Tabla 5 se recogen los rendimientos en verde de la alfalfa en kilos por hectárea tanto en seco como en regadío en España.

Tabla 5. Rendimientos en verde de la alfalfa en kilos por hectárea tanto en seco como en regadío en España. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.

CULTIVOS FORRAJEROS	Rendimiento en Verde (kg/ha)	
	Secano	Regadío
GRAMÍNEAS	80.894	152.679
LEGUMINOSAS	79.113	141.502
ALFALFA	11.015	50.204
RAICES Y TUBÉRCULOS	54.805	123.291
PRADERAS POLIFITAS	19.499	25.580
FORRAJERAS VARIAS	46.985	54.385
TOTAL CULTIVOS FORRAJEROS	281.296	497.437

En la Tabla 5 se observa como los cultivos forrajeros de gramíneas presentan los mayores rendimientos, seguidos por las leguminosas. Además, los rendimientos de todos los cultivos son significativamente más altos en sistemas de regadío que en seco. En el caso específico de la alfalfa, este cultivo representa el 14% de la superficie en seco de leguminosas, mientras que alcanza el 35% en regadío, evidenciando que la alfalfa se cultiva principalmente en sistemas de irrigación, aprovechando los mayores rendimientos que se obtienen en esas condiciones.

Los destinos más comunes para la producción de cultivos forrajeros en general son el heno y el ensilado, mientras que, en el caso específico de las leguminosas, los principales usos son el heno y la deshidratación. Para el cultivo de alfalfa en particular, la Figura 4 muestra que los destinos predominantes son la deshidratación y la producción de heno, superando claramente al resto de usos para este cultivo.

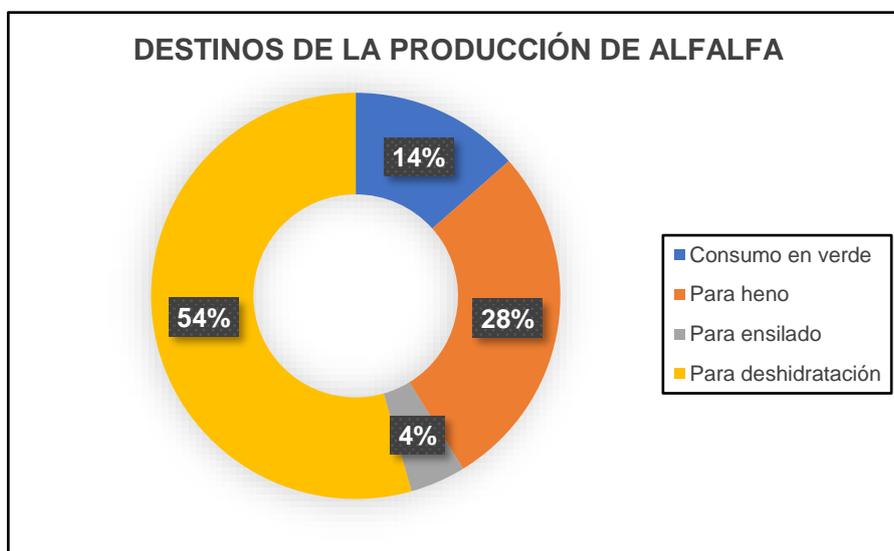


Figura 4. Destinos de la producción de alfalfa expresados en porcentaje en España. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.



Figura 5. Mapa de la superficie cosechada de alfalfa por Comunidades Autónomas en España. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.

En función del área dedicada al cultivo de alfalfa en las distintas Comunidades Autónomas en España, destaca Castilla y León como la región principal, seguida por Andalucía y Castilla La Mancha. Estos datos quedan reflejados en la Figura 5, donde se puede observar la notable diferencia en superficie cosechada entre estas tres comunidades y el resto del territorio nacional.

La Figura 6 ilustra la evolución de la superficie cultivada de alfalfa en España durante el período 2012-2022. Los datos revelan que la superficie máxima fue alcanzada en 2016 favorecida por condiciones climatológicas óptimas que incluyeron una primavera lluviosa y temperaturas moderadas, seguidas de una tendencia decreciente en años posteriores. La evolución de la producción de la alfalfa también experimentó esa trayectoria. Sin embargo, el valor económico del cultivo ha seguido una trayectoria diferente, registrando su mínimo en 2017 para luego experimentar un notable incremento hasta alcanzar máximos históricos en años recientes, impulsado principalmente por el aumento de los costes de producción y una mayor demanda del mercado.

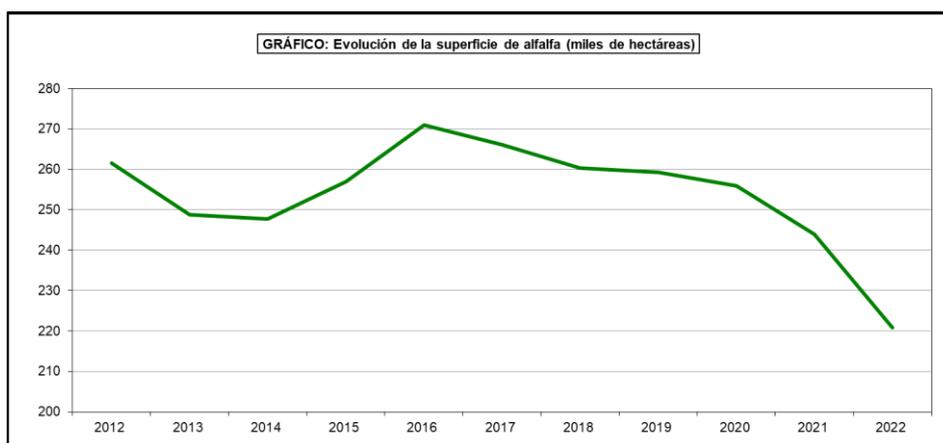


Figura 6. Evolución de la superficie cultivada de alfalfa en miles de hectáreas en España desde el año 2012 hasta el 2022. Fuente: Anuario de Estadística del MAPA, 2023.

En resumen, la alfalfa representa el 51% de la familia de las leguminosas, segundo grupo de cultivos forrajeros con mayor superficie de producción en España. La producción se destina

principalmente a dos usos: la elaboración de heno y el proceso de deshidratación. En cuanto a su distribución territorial, Castilla y León destaca como la principal región productora del país. El análisis temporal del período 2012-2022 revela dos tendencias contrapuestas: por un lado, una disminución progresiva tanto en la superficie cultivada como en la producción total, y por otro, un incremento significativo en su valor económico, alcanzando cotizaciones históricamente elevadas en los últimos años.

2.3. Nitrógeno y clorofila en planta

2.3.1. Nitrógeno en planta

El Nitrógeno (N) es uno de los tres macronutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas fundamental en el proceso de formación de proteínas, ácidos nucleicos y clorofila en las plantas (Sela, 2019). En el caso concreto de la alfalfa, existen dos formas de absorción de este nutriente. La primera consiste en la fijación simbiótica del nitrógeno atmosférico en los nódulos de las raíces de la alfalfa generados por la bacteria *Rhizobium meliloti* y convertidos posteriormente en asimilables por la planta. La segunda se trata de la absorción del nitrógeno de forma directa del suelo en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) siendo preferible esta opción por la planta cuando existe nitrógeno disponible en el suelo (Delgado & Muñoz, 2005).

Las plantas que experimentan deficiencias en nitrógeno experimentan un crecimiento lento, sus hojas más viejas adquieren un color verde pálido y son más pequeñas. Las fuentes de nitrógeno aplicadas a la alfalfa pueden ser de origen orgánico como el estiércol o compost o pueden provenir de origen mineral que presenta una alta concentración de nitrógeno disponible en forma de amonio, nitrato y urea (Sela, 2019).

2.3.2. Clorofila en planta

La Clorofila (Chl) es un pigmento vegetal fundamental para la vida de las plantas, responsable tanto de su característico color verde como del proceso de fotosíntesis, donde transforma la energía lumínica en energía química. Durante este proceso, absorbe principalmente los rayos rojos y azules de la luz solar, convirtiendo seis moléculas de agua y dióxido de carbono en glucosa y oxígeno. Existen diversos tipos de clorofila, siendo la A esencial para las reacciones fotoquímicas y presente en todos los organismos fotosintéticos, la B actúa como antena receptora en plantas y algas verdes, mientras que las clorofilas C, D, E y F se encuentran en diferentes tipos de algas y cianobacterias (Acosta, 2020).

La clorofila destaca por sus múltiples aplicaciones y beneficios, incluyendo sus propiedades antioxidantes y antibacterianas que la hacen valiosa en la prevención del cáncer y en productos de higiene personal, además de su uso como colorante natural en alimentos, medicamentos y cosméticos (Acosta, 2020). En este contexto, la alfalfa sobresale como uno de los cultivos con mayor contenido de clorofila, gracias a su extenso sistema radicular que le permite absorber nutrientes desde grandes profundidades del suelo (Cabrales, 2023).

2.4. Determinación de nitrógeno y clorofila en planta

Existen diferentes técnicas para determinar la concentración de nitrógeno y clorofila en las plantas siendo especialmente relevantes y analizadas en este estudio el SPAD y la teledetección mediante drones.

2.4.1. Medición Directa mediante SPAD

El SPAD es un dispositivo avanzado que permite medir de forma no invasiva diversos parámetros importantes en las hojas de las plantas, incluyendo el nivel de clorofila, el Índice de Equilibrio de Nitrógeno (NBI), y los índices de antocianinas y flavonoides. Utiliza tecnología LED para medir la

2. ANTECEDENTES Y REVISIÓN SISTEMÁTICA.

absorción de luz a 650 nm y 940 nm, proporcionando resultados precisos y rápidos. Su función principal es evaluar la concentración de clorofila, que indica la actividad fotosintética y la salud general de la planta, permitiendo realizar múltiples mediciones en la misma hoja durante diferentes etapas de crecimiento (Li et al., 2022).

El SPAD evalúa varios parámetros clave, incluyendo el Índice de Equilibrio de Nitrógeno (NBI), que proporciona una medición más precisa del estado del nitrógeno en la planta al combinar los valores de clorofila y flavonoides, mostrando menor sensibilidad a las variaciones ambientales que la medición de clorofila por sí sola (Rivacoba et al., 2014). Adicionalmente, el dispositivo mide el índice de flavonoides (Flav), que refleja cómo responden las plantas a la exposición lumínica y al estrés ambiental, siendo los flavonoides pigmentos naturales con función protectora vegetal contra agentes oxidantes (Martínez-Flórez et al., 2002). También registra el índice de antocianinas (Anth), que sirve como indicador de las respuestas de la planta ante situaciones de estrés y sus mecanismos de protección (Instruments, 2024). Sin embargo, su función más importante es la medición de la concentración de clorofila encargada de indicar la actividad fotosintética y la salud general de la planta (Rivacoba et al., 2014).

2.4.2. Teledetección con drones

La teledetección es una técnica consistente en la medición de propiedades de objetos mediante un sensor portado en una plataforma, sin estar en contacto directo con ellos, y analizar los datos adquiridos para evaluar los cambios en las condiciones y el progreso hacia el cumplimiento de un objetivo de gestión (Eng et al., 2019).

El vehículo aéreo no tripulado (UAV), comúnmente conocido como dron, es una aeronave sin piloto a bordo que puede ser operado de forma remota (RPA), es decir, controlado por un operador humano, o completamente autónomo. Originalmente se empleaba principalmente en aplicaciones militares, pero actualmente está expandiendo su uso (Bansod et al., 2017).

Los sistemas UAV con cámaras multispectrales constituyen una tecnología innovadora para la captura avanzada de imágenes, especialmente en agricultura de precisión. Estos dispositivos pueden registrar entre 4 y 15 bandas espectrales, abarcando un rango amplio de longitudes de onda (400 nm a 12.500 nm), lo que les permite superar las limitaciones de la percepción visual humana (Dintén, 2020).

Las cámaras multispectrales integradas en drones capturan información en tres regiones espectrales principales: espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta. Esta capacidad permite obtener datos detallados sobre materiales y entornos que son imperceptibles al ojo humano (Leskow, 2024).

La tecnología presenta ventajas significativas como resoluciones de 12 a 48 MP, autonomía de vuelo entre 20 y 40 minutos, y funciones adicionales como seguimiento de objetos y tomas panorámicas (Sánchez, 2023). Además, su desarrollo continuo ha contribuido a la reducción progresiva de costos, haciéndola cada vez más accesible para investigación y aplicaciones prácticas (Bansod et al., 2017).

La teledetección con drones es una técnica avanzada de observación territorial que utiliza vehículos aéreos no tripulados equipados con sensores especializados. Estos dispositivos capturan imágenes de alta resolución en múltiples bandas espectrales, permitiendo generar mapas detallados y modelos digitales del terreno.

3.OBJETIVOS.

3. OBJETIVOS.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar la eficacia de la teledetección mediante drones equipados con sensores multiespectrales en la determinación precisa de los niveles de nitrógeno y clorofila en cultivos de alfalfa, estableciendo una comparativa con otras técnicas convencionales como las mediciones directas con SPAD.

Los objetivos específicos se recogen a continuación:

- Implementar nuevas técnicas de monitorización y seguimiento de cultivos que permitan una gestión más eficiente y precisa de los recursos agrícolas.
- Comparar los resultados obtenidos mediante la teledetección con drones y las mediciones tradicionales empleando el SPAD, evaluando la precisión, fiabilidad y potencial de cada técnica.
- Desarrollar y validar protocolos innovadores de seguimiento y evaluación del estado nutricional de un cultivo, utilizando vehículos aéreos no tripulados equipados con sensores multiespectrales.
- Identificar y analizar las ventajas y limitaciones de la teledetección como herramienta de diagnóstico agrícola.

4.MATERIAL Y MÉTODOS.

En el presente estudio se ha implementado una metodología dual: por un lado, se ha realizado una revisión sistemática para establecer el marco teórico y contextual de la investigación, y por otro, se han desarrollado procedimientos específicos para la obtención de datos orientados a la determinación de los niveles de nitrógeno y clorofila en el cultivo de la alfalfa.

4.1. Revisión sistemática

Una revisión sistemática es una metodología de investigación que busca condensar el conocimiento existente sobre un tema específico (Manterola et al., 2013). Se trata de un estudio que identifica, evalúa y sintetiza toda la evidencia empírica disponible que cumple con criterios de elegibilidad preestablecidos para responder a una pregunta de investigación específica. Además, las revisiones sistemáticas proporcionan una base sólida para la toma de decisiones clínicas, la elaboración de guías de práctica y la evaluación de tecnologías sanitarias, al recopilar y analizar de forma rigurosa la evidencia relevante en un campo determinado (Moreno et al., 2018).

La revisión sistemática es un proceso dividido en tres fases principales: identificación de artículos, cribado de los inválidos y codificación de los seleccionados. Estas fases se desarrollan a lo largo de los siguientes apartados.

4.1.1. Búsqueda de artículos

La primera fase es la búsqueda de artículos, en este caso, en dos bases de datos de publicaciones científicas, Web of Science (WoS) y Scopus. Se tratan de dos de las bases de datos bibliográficas y de citas más importantes en el ámbito académico y científico. Todas las búsquedas se han realizado en inglés para obtener una mayor amplitud de información a nivel nacional e internacional.

WoS proporciona herramientas de análisis que permiten valorar la calidad científica de las publicaciones (Falagas et al., 2008). Scopus es la base de datos más amplia en referencias bibliográficas con resúmenes y citas de literatura científica revisada por pares (Mongeon & Paul-Hus, 2016).

Las búsquedas realizadas se corresponden con palabras clave relacionadas con la siguiente pregunta científica:

“¿Podemos caracterizar el comportamiento del cultivo de alfalfa a través de índices de vegetación?”

El recopilatorio de las diferentes búsquedas se recoge en la Tabla 6. Las diferentes búsquedas se encuentran formadas por varios conceptos interconectados mediante el empleo del conector AND que permite la recopilación de artículos con información correspondiente a ambos.

Tabla 6. Diferentes combinaciones de búsquedas para la obtención de artículos. Fuente: Elaboración propia.

COMBINACIÓN	AND	
1	Alfalfa	Culture
2	Alfalfa culture	Indices of vegetation
3	Alfalfa culture	Chlorophyll
4	Alfalfa culture	Nitrogen
5	Drone images	Chlorophyll
6	Formules	Indices of vegetation
7	Indices of vegetation	Chlorophyll
8	Indices of vegetation	Nitrogen
9	Drone images	Indices of vegetation
10	Drone images	Nitrogen
11	Drone images	Alfalfa

Se han obtenido 6.573 artículos en Web of Science y 16.364 en Scopus con un total de 22.937. Todos los artículos encontrados han sido recogidos en una única hoja de cálculo de Excel y ordenados alfabéticamente.

4.1.2. Cribado de artículos

La siguiente fase es el cribado que permite la reducción de los artículos disponibles y se compone de varios pasos. El primero consiste en una vez ordenados los artículos, la eliminación de aquellos que se encuentran **duplicados** descartando 3.512.

Posteriormente, se ha realizado una eliminación por **título** de 19.137 artículos, debido a diversas razones como: objetivos no compatibles con el de este proyecto de investigación (n = 17.037), artículos referentes a cultivos diferentes a la alfalfa (n = 951), artículos legibles en idiomas distintos al español o al inglés (n = 846) o por recopilaciones de informaciones expuestas en conferencias (n = 251) entre otros.

La última selección de artículos se ha llevado a cabo atendiendo al **resumen** descartándose 213 artículos debido a razones como la falta de relevancia frente a este proyecto de investigación (n = 152), cultivo diferente a la alfalfa (n = 34) o exposición de conferencias (n = 19).

A continuación, se lleva a cabo una eliminación **final** en la que se descartan otros 20 artículos por falta de disponibilidad (n = 9), idioma no legible (n = 2) y revisiones sistemáticas o capítulos de libros (n = 9).

Por tanto, para la última fase, la codificación, han sido seleccionados **55 artículos** de los cuales 44 son de acceso abierto y 11 de acceso cerrado.

4.1.3. Codificación de artículos

Una vez que se ha llevado a cabo la selección final de artículos, se desarrolla una codificación de la información. Tal y como se muestra en la Tabla 7, se establecen distintos niveles en los que se recogen palabras clave para la obtención de la información procedente de los artículos. En estos niveles se resume el interés que se tiene de los artículos seleccionados con el fin de obtener bibliografía acorde al objetivo del proyecto de investigación (García-Perdomo, 2015).

Tabla 7. Niveles de codificación de los artículos. Fuente: Elaboración propia.

CODIFICACIÓN	SUBCODIFICACIÓN	EXPLICACIÓN
Definición	Alfalfa	Conocimiento de la alfalfa como cultivo.
	Agricultura de Precisión	Tipo de agricultura de aplicación actual.
	Imágenes de dron	Obtención y definición de una de las técnicas empleadas en este estudio.
	Índices de Vegetación	Definición de los diferentes índices de vegetación existentes.
	SPAD	En qué consiste este instrumento y qué funciones tiene.
	Teledetección	Cómo se define esta técnica.
Introducción	Cultivo de Alfalfa	Técnicas agronómicas para el cultivo de la alfalfa y necesidades de nutrientes.
	Dron	Qué es este instrumento, qué funciones tiene, y sus distintos tipos.
	Situación Actual	En qué momento se encuentra el cultivo de la alfalfa dentro del sector económico.
Materiales y Metodología	Imágenes de dron	Procesamiento de estas imágenes para determinar la concentración de nitrógeno y clorofila en la alfalfa.
	Índices de Vegetación	Fórmulas para calcular los diferentes índices de vegetación útiles en la determinación del contenido de nitrógeno y clorofila.
	Software	Útiles en el procesamiento de información obtenida como las imágenes de los drones.
Objetivo	Fórmulas	Obtención de fórmulas para la determinación precisa del contenido del nitrógeno y la clorofila en la alfalfa.
Resultados	Fórmulas	Posibles fórmulas nuevas que ayuden a determinar los contenidos del nitrógeno y la clorofila en la alfalfa.
	Efecto positivo	Resultado positivo utilizando la teledetección.
	Efecto negativo	Resultado negativo utilizando la teledetección.

En esta fase, por tanto, se procede a la lectura de cada uno de los artículos seleccionados destacando y clasificando cada idea importante en los niveles de la tabla anterior.

La estructura de codificación se organiza jerárquicamente en tres niveles distintos e interrelacionados: el primer nivel corresponde a la codificación principal, que se alinea directamente con los apartados fundamentales del proyecto; el segundo nivel consiste en la subcodificación, que desarrolla y desglosa con mayor detalle los elementos del nivel superior; y finalmente, el tercer nivel comprende la subsubcodificación, que proporciona el máximo grado de especificidad y detalle en el análisis. En la tabla anterior se muestran los niveles más representativos, aunque cabe destacar que la codificación real contiene elementos adicionales.

El proceso de la revisión sistemática detallado paso a paso se representa gráficamente en la Figura 7 con un resultado final de **55 artículos seleccionados**.

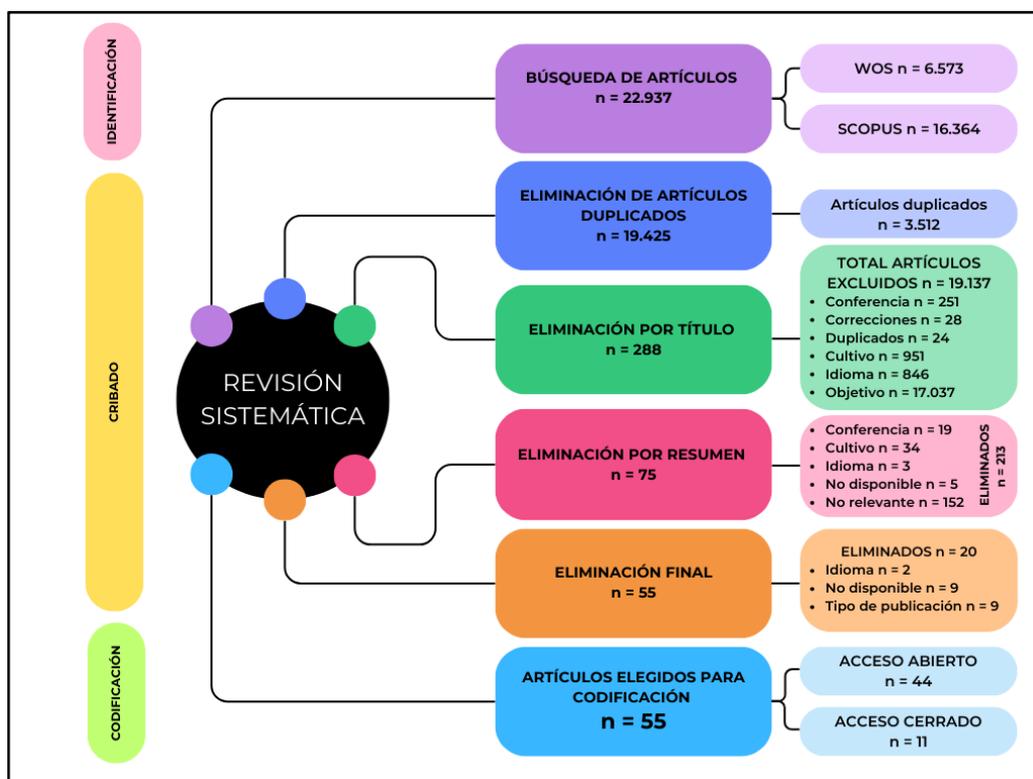


Figura 7. Revisión sistemática paso a paso. Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Análisis de los datos

La codificación, fase final de la revisión sistemática, es necesaria para que los artículos puedan ser procesados por NVIVO, software especializado en el análisis cualitativo de datos (Hernández-Soto et al., 2021). Se trata de una herramienta muy útil para realizar revisiones sistemáticas ya que es capaz de procesar un gran volumen de literatura de forma eficiente y rigurosa.

NVIVO es un software avanzado para el análisis de datos cualitativos y de métodos mixtos, ampliamente utilizado en investigación académica, gubernamental y comercial. Su principal fortaleza radica en su capacidad para centralizar, organizar y analizar una gran variedad de datos no estructurados, incluyendo textos, multimedia, encuestas y contenido web. NVIVO ofrece herramientas poderosas para la codificación y categorización de datos, análisis de contenido, comparación sistemática, visualización de resultados y búsqueda avanzada de información.

Estas funcionalidades permiten a los investigadores identificar temas, patrones y tendencias en sus datos de manera eficiente (García, 2023).

4.2. Parcela de estudio

4.2.1. Descripción de la parcela de estudio

La parcela de estudio se encuentra localizada en el Centro Integrado de Formación Profesional Viñalta en las afueras de la ciudad de Palencia accediéndose a través de la carretera Ampudia-Palencia.

Esta parcela se ubica en España en la Comunidad Autónoma de Castilla y León en la provincia y municipio de Palencia (Figura 8) a 2 km de la zona centro-oeste de esta ciudad y está formada por cuatro recintos tal y como se muestra en la Figura 9 siendo el recinto 1 el escogido para los muestreos y donde se encuentra implantado el cultivo de alfalfa.

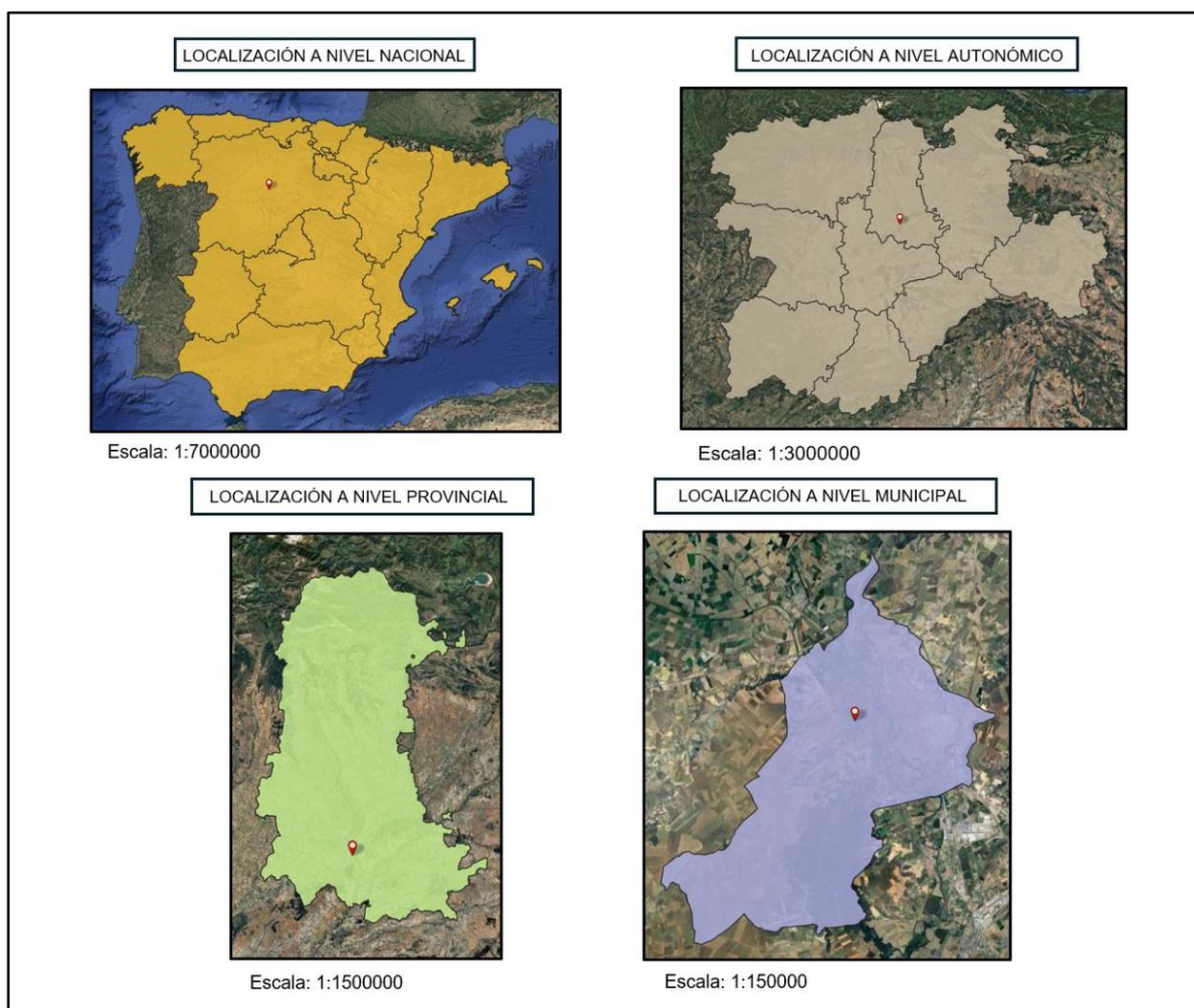


Figura 8. Localización de la parcela de estudio. Fuente: Elaboración propia.

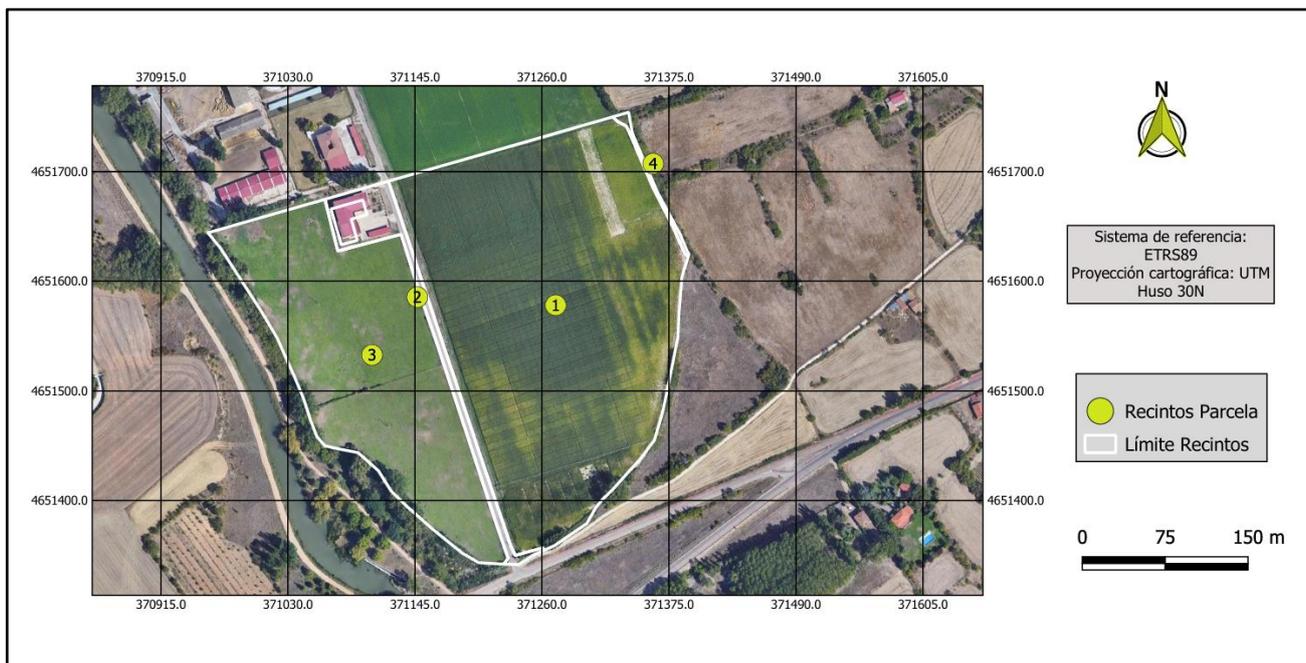


Figura 9. Recintos de la parcela objeto de estudio en Viñalta (Palencia). Escala: 1:4000. Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS.

Los datos y características de la parcela de estudio se encuentran recogidos en la Tabla 8.

Tabla 8. Datos de la parcela de estudio. Fuente: SIGPAC.

DATOS PARCELA	
Provincia	34 – Palencia
Municipio	900 – Palencia
Agregado	0
Zona	0
Polígono	15
Parcela	50
Superficie (ha)	11,1172
Referencia Catastral	34900A015000500000JS

En la Figura 10 se encuentra representado el recinto concreto donde se han llevado a cabo los ensayos (Recinto 1) cuyas características principales son las siguientes:

- Latitud = 42° 0' 20,596" N
- Longitud = 4° 33' 16,304" W
- Coordenadas UTM Huso 30N = 628.732,531 m, 4.651.580,260 m
- Altitud sobre el nivel del mar = 733 m
- Superficie = 6,8782 ha
- Pendiente = 1,40 %
- Uso = TA (Tierras Arables)
- Coeficiente de Regadío = 100 %

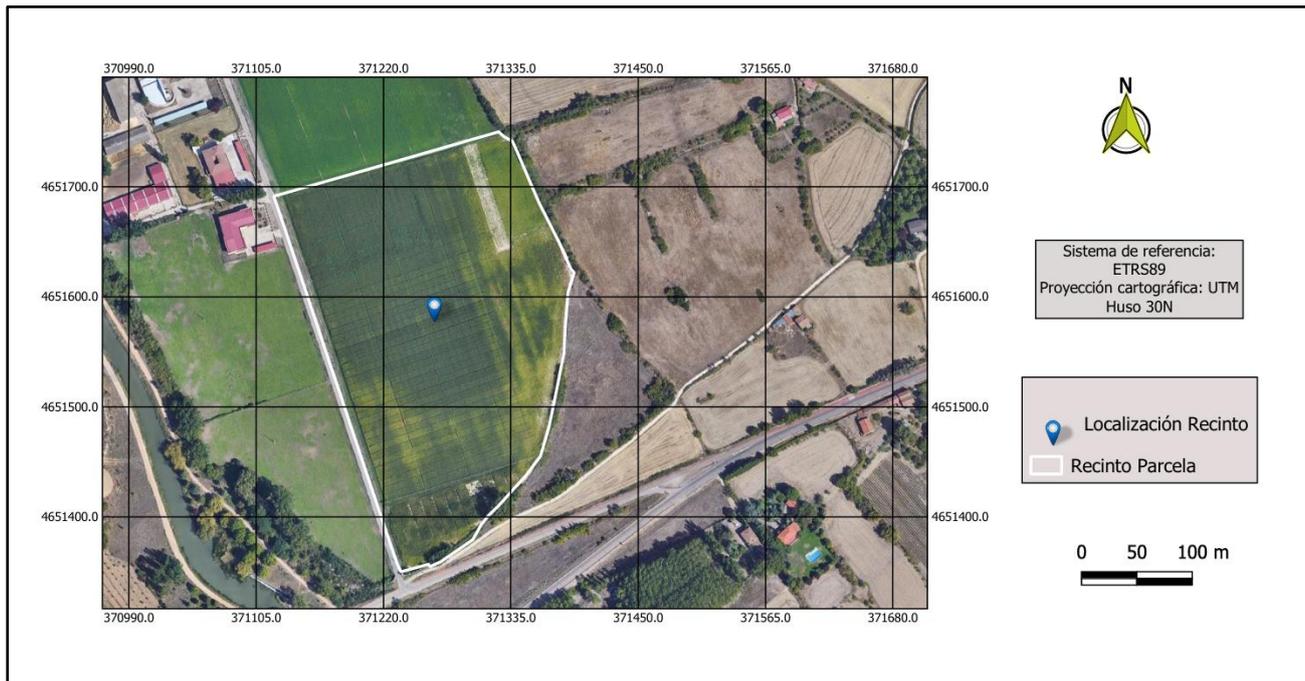


Figura 10. Recinto 1 de la parcela de ensayo de Viñalta (Palencia). Escala: 1:4000. Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS.

4.2.2. Estudio climático

El estudio climático de Viñalta (Palencia) es esencial para comprender las condiciones agroclimáticas que influyen en el cultivo de la alfalfa. Los datos han sido obtenidos de Inforiego, que se trata de un servicio web gestionado por ITACyL que proporciona datos meteorológicos en tiempo real e históricos a través de una red de estaciones meteorológicas en Castilla y León. Para este estudio se ha empleado una serie de datos de 20 años completos desde el año 2003 hasta el año 2023 de la estación meteorológica de Villamuriel de Cerrato (Palencia).

4.2.2.1. Cuadro de temperaturas

Las temperaturas influyen directamente en el crecimiento, desarrollo, productividad y calidad de la alfalfa además de ser fundamentales para la toma de decisiones en el manejo agronómico. En la Figura 11 se recoge un cuadro resumen de la evolución de las medias de las temperaturas máxima, media y mínima en Viñalta entre los años 2003 y 2023.

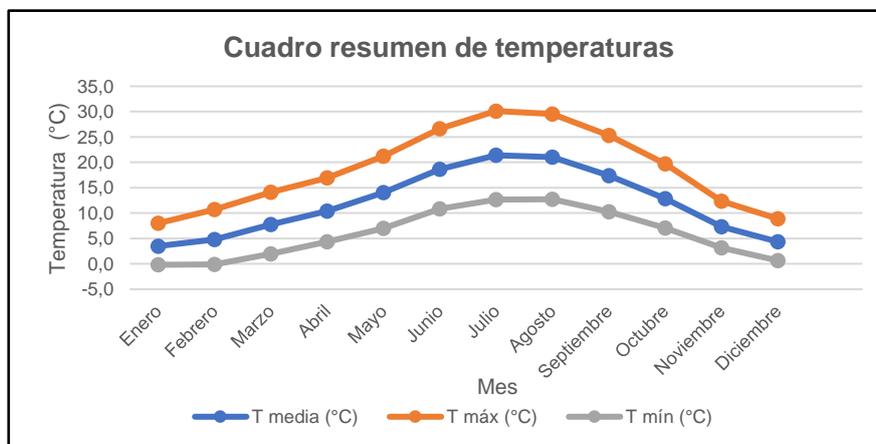


Figura 11. Cuadro resumen de temperaturas de Viñalta (Palencia) entre el año 2003 y 2023. Fuente: Inforiego, Estación Meteorológica de Villamuriel de Cerrato.

4.2.2.2. Precipitaciones

Las precipitaciones desempeñan un papel crucial en el estudio climático para el cultivo de alfalfa, ya que determinan la disponibilidad hídrica para la planta que afecta directamente al crecimiento, producción y calidad del forraje.

El análisis de las precipitaciones medias mensuales en Viñalta entre 2003 y 2023 representado en la Figura 12 muestra dos periodos máximos de precipitación, uno en abril y otro más intenso en noviembre, mientras que los valores mínimos se registran durante julio y agosto. El patrón anual describe una curva donde las lluvias se mantienen estables a principios de año, descienden en verano y se recuperan significativamente en otoño, con una disminución final en diciembre.

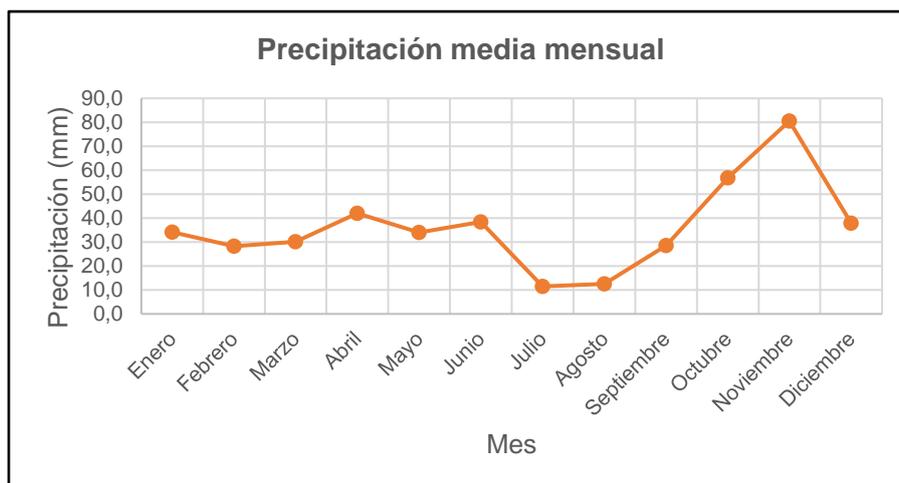


Figura 12. Evolución de las precipitaciones medias mensuales en el periodo de años 2003-2023 en Viñalta (Palencia). Fuente: Inforiego, Estación Meteorológica de Villamuriel de Cerrato.

4.2.2.3. Vientos

En la Figura 13 se muestra la rosa de los vientos de la zona de estudio, un gráfico que muestra la frecuencia y dirección de los vientos registrados en los últimos años.

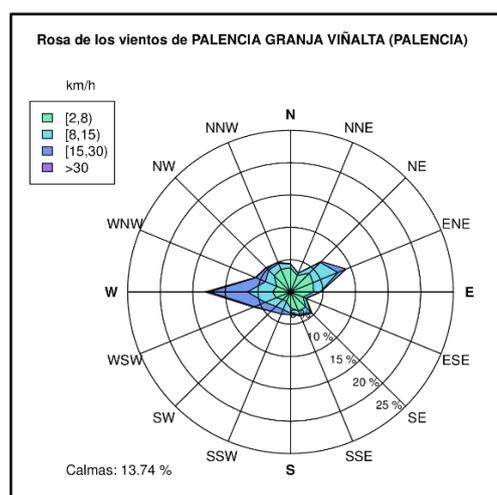


Figura 13. Rosa de los vientos de la estación meteorológica de Viñalta (Palencia).

Las líneas radiales indican las diferentes direcciones cardinales (N, NE, E, SE, S, etc.). Las áreas sombreadas muestran de qué direcciones vienen los vientos con mayor frecuencia. Los

diferentes colores representan distintos rangos de velocidad del viento, medidos en kilómetros por hora. Las calmas indican que el 13.74% del tiempo no hubo viento.

Atendiendo a la figura anterior, la mayor parte de los vientos en Viñalta durante el periodo analizado provinieron del oeste-suroeste (WSW) con velocidades mayoritariamente entre 2 y 15 km/h. Además, las calmas indican que el 13.74% del tiempo no hubo viento.

4.2.2.4. Resumen climático

En la Tabla 9 se representa un resumen climático de Viñalta (Palencia) donde se recogen las variables más representativas que son medias de las temperaturas media, máxima y mínima, la precipitación, la velocidad del viento y la radiación.

Tabla 9. Cuadro resumen de las principales variables climáticas entre los años 2003 y 2023 en Viñalta (Palencia). Fuente: Inforiego, Estación Meteorológica de Villamuriel de Cerrato.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
T media (°C)	3,49	4,77	7,77	10,41	14,03	18,65	21,40	21,00	17,36	12,82	7,34	4,34	11,95
T máx (°C)	7,99	10,73	14,14	16,93	21,21	26,63	30,12	29,52	25,32	19,68	12,34	8,90	18,62
T mín (°C)	-0,20	-0,14	1,99	4,36	7,01	10,86	12,65	12,72	10,24	7,06	3,15	0,64	0,64
Precipitación (mm)	34,17	28,28	30,17	42,00	33,95	38,39	11,49	12,49	28,55	56,81	80,51	37,83	434,64
V viento (m/s)	2,07	2,25	2,41	2,05	1,71	1,56	1,69	1,69	1,51	1,60	1,94	1,82	1,86
Radiación (MJ/m ²)	5,92	9,74	14,40	18,70	23,39	25,69	27,38	24,07	18,29	11,66	6,88	5,14	15,94

En la tabla anterior, se observa como las temperaturas oscilan entre los 0,64 °C de mínima y los 18,62 °C de máxima con una temperatura media anual de 11,95 °C. Los meses con temperaturas más bajas son diciembre, enero y febrero y los veranos son cálidos.

La precipitación total anual es de aproximadamente 435 mm distribuida de forma irregular a lo largo del año. Los meses más lluviosos son octubre y noviembre, mientras que los meses más secos son julio y agosto.

La velocidad media anual del viento es de 1,86 m/s, con variaciones significativas a lo largo del año. Los meses con vientos más intensos son marzo y abril, mientras que los valores más bajos se registran en septiembre y los meses estivales.

En cuanto a la radiación solar, la zona de Viñalta presenta una radiación media anual de 15,94 MJ/m². Los meses de mayor radiación son junio, julio y agosto, mientras que los valores más bajos se observan en diciembre y enero.

4.2.2.5. Diagrama ombrotérmico

El diagrama ombrotérmico representado en la Figura 14, correspondiente a la estación meteorológica de Viñalta (Palencia), es una representación gráfica que relaciona temperaturas y precipitaciones a lo largo del año. En este gráfico de doble entrada se muestran los meses en el eje horizontal, mientras que en los ejes verticales se registran las temperaturas medias mensuales (°C) y las precipitaciones mensuales (mm). La escala del diagrama se establece siguiendo la relación 2:1 entre temperatura y precipitación (2T = P; 2°C = 1 mm), permitiendo así identificar de manera visual los periodos de sequía (Díaz San Andrés, A., 2019).

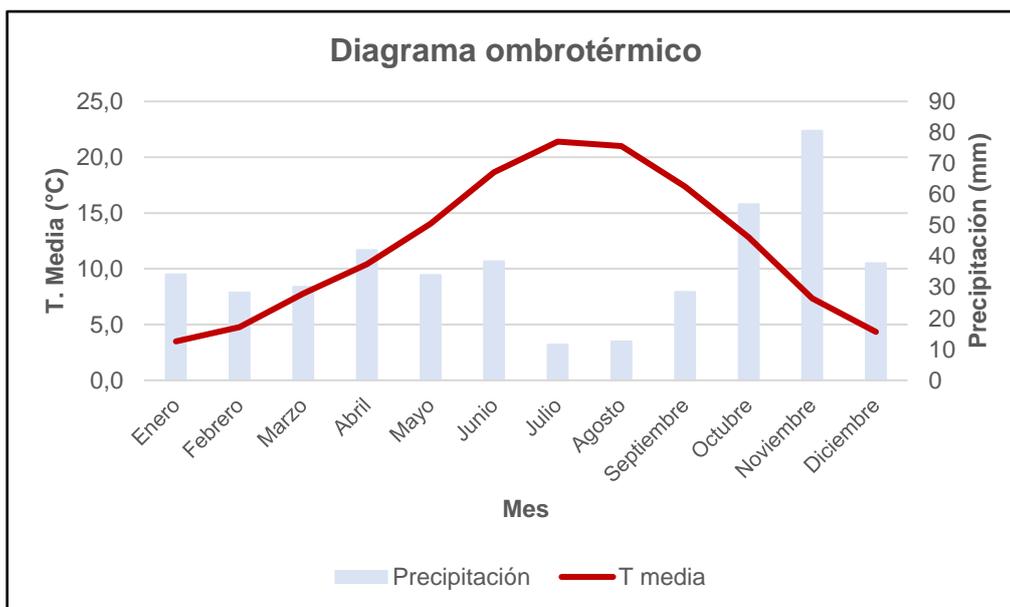


Figura 14. Diagrama ombrotérmico de Gaussen de Viñalta (Palencia) para el período de años 2003-2023.

En el climograma anterior, se observa una marcada estacionalidad de la temperatura media con valores más bajos en los meses de invierno y más altos en los de verano. La distribución de las precipitaciones a lo largo del año es irregular. Y, atendiendo a la relación temperatura-precipitación, la combinación de altas temperaturas y bajas precipitaciones en los meses de verano (julio-agosto) indica la presencia de un período de sequía estacional.

En conclusión, este estudio revela un clima mediterráneo continentalizado caracterizado por veranos cálidos y secos, e inviernos fríos, pero con precipitaciones distribuidas irregularmente a lo largo del año.

4.3. Determinación de Nitrógeno y Clorofila

Para la determinación de la cantidad de nitrógeno y clorofila en el cultivo de alfalfa se ha recurrido a la parcela de regadío del Centro Integrado de Formación de Viñalta en Palencia descrita posteriormente y se han empleado dos técnicas diferentes:

4.3.1. **Medición Directa mediante SPAD**

Para la técnica de medida directa mediante SPAD, se realizaron cuatro muestreos para los cuales se necesitaron tijeras para cortar las hojas, papel absorbente para evitar la deshidratación de las muestras, bolsas de plástico con cierre zip para el almacenamiento de las muestras, rotuladores permanentes para marcarlas, nevera para la conservación de las muestras y spray de agua para humedecerlas además del SPAD para analizar los contenidos de nitrógeno y clorofila de las plantas. El modelo del SPAD empleado era el Dualox METOS leaf sensor del fabricante Pessl Instruments en Werksweg, Austria (Figura 15).

El muestreo del cultivo de alfalfa iniciado tras su corte el 25 de abril de 2024, se desarrolló en cuatro momentos durante los meses de mayo y junio del año 2024. La primera medición se realizó el 16 de mayo de 2024, en fase vegetativa de la alfalfa, implementando un método de muestreo cuidadosamente planificado para asegurar la representatividad de los resultados.



Figura 15. Medida directa mediante SPAD en el cultivo de alfalfa de la parcela estudio de Viñalta. Fuente: Elaboración propia.

El proceso de muestreo contempló la selección de 10 puntos distribuidos aleatoriamente por la parcela (Figura 16), los cuales fueron debidamente señalizados con estacas para garantizar la precisión de su localización en futuras mediciones.

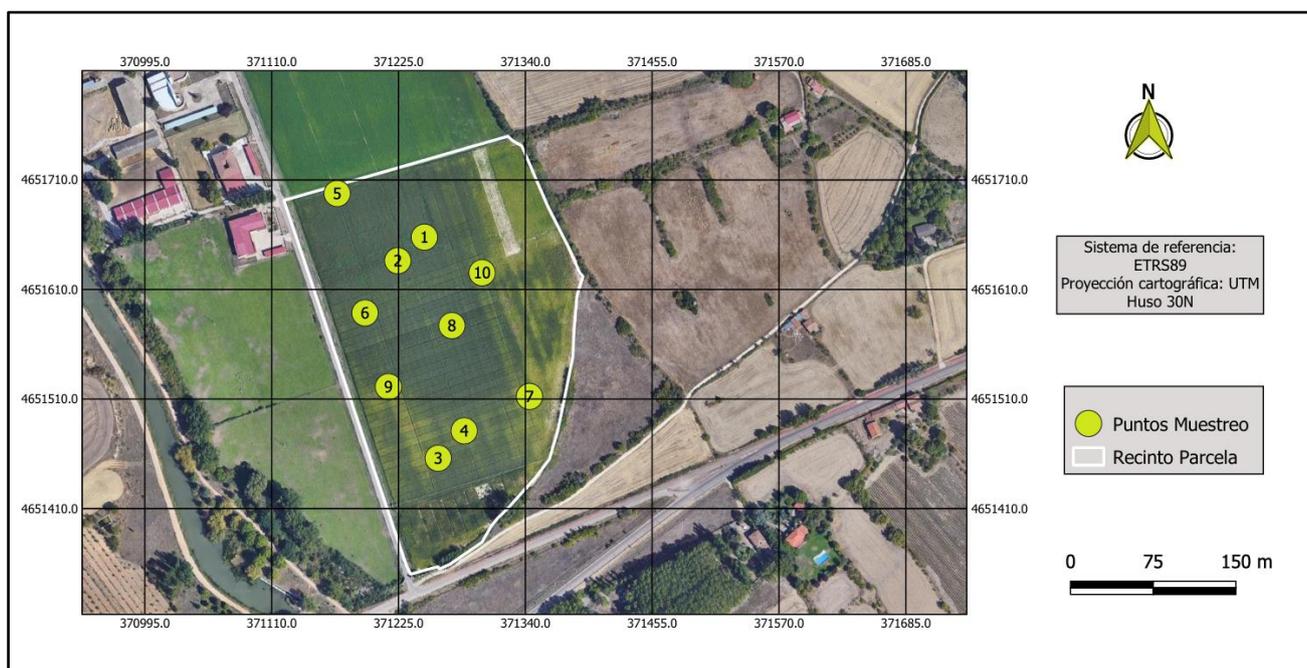


Figura 16. Ubicación de los puntos de muestreo en la parcela objeto de estudio en Viñalta. Escala: 1: 4000. Fuente: Elaboración propia a partir de QGIS.

En cada punto de muestreo se procedió a recolectar información de dos plantas diferentes, extrayendo de cada una dos hojas: una hoja de la zona superior y otra de la zona inferior.

La decisión de recoger dos hojas de cada planta pretende obtener una representación lo más completa posible de las características del cultivo. Las hojas superiores, al ser más desarrolladas, más antiguas y con mayor capacidad de almacenamiento de nutrientes, proporcionan información crucial complementaria a la obtenida de las hojas inferiores.

Una vez recolectadas, las hojas fueron analizadas in situ utilizando el SPAD para obtener el Índice de Balance de Nitrógeno (NBI) y el contenido en flavonoides, antocianinas y clorofila del cultivo.

Este mismo proceso de medición se replicó de manera idéntica los días 23 en fase de botón floral, 30 de mayo de 2024 durante la floración de la alfalfa y 6 de junio de 2024 en plena fructificación del cultivo, manteniendo la rigurosidad metodológica en cada medición.

Estas mediciones se recogieron en hojas de cálculo de Excel para posteriormente, poder obtener promedios y estadísticas de los datos obtenidos en la parcela.

4.3.2. Teledetección con drones

Las adquisiciones aéreas se realizaron el mismo día en el que se tomaron en campo las mediciones con el SPAD, la misión se realizó a una altitud de 50 m, a una velocidad aproximada de 4,4 m/s y con una duración de 20 minutos de cada vuelo en cada muestreo de la parcela evaluada (Figura 17). Las imágenes tenían una huella de píxel (GSD) de 2.31 cm por píxel, incorporando un 80% de superposición frontal y un 70% de superposición lateral.

Para la obtención de las imágenes, se ha empleado un dron DJI Mavic 3M (Figura 17) con una autonomía de vuelo de 43 minutos, un alcance máximo de 32 kilómetros y un peso de 951 gramos destacando por su versatilidad y su capacidad técnica. Está equipado con un sistema de doble cámara, integra una cámara RGB de 20 MP capaz de capturar vídeo en 4K y una cámara multispectral de 5 MP con cuatro bandas espectrales (DJI, 2024).



Figura 17. Dron DJI Mavic 3M en los muestreos de la parcela de Viñalta.

Para la elaboración de la ortofoto y los índices de vegetación, las imágenes fueron procesadas utilizando el software Pix4Dmapper (versión 4.4.12). el flujo de trabajo se realizó de forma estándar para imágenes RGB y multispectrales, aplicando las configuraciones "3D Maps" y "Ag Multispectral" respectivamente. El software Pix4D es líder en el campo de la fotogrametría y especializado en el procesamiento de imágenes capturadas desde diferentes perspectivas, ya sea por drones, aviones o dispositivos móviles. Su objetivo principal es generar modelos tridimensionales y mapas de alta resolución que ofrecen una visión cartográfica uniforme y detallada y el desarrollo de mapas de índices especializados, como el NDVI, particularmente útil en aplicaciones agrícolas entre otras ("Pix4D: ¿Qué es y para qué sirve?", 2022).

Dentro de las distintas herramientas que presenta este software se ha empleado la Pix4Dmapper para el mapeo profesional con drones. Ha permitido la obtención de ortomosaicos de la parcela

de estudio para a partir de ellos poder determinar los diferentes índices de vegetación explicados a continuación.

El **Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)** es un parámetro que mide el vigor y salud de la vegetación utilizando la información captada por sensores remotos en dos bandas espectrales específicas: el rojo y el infrarrojo cercano. Este índice aprovecha el contraste entre la fuerte absorción de la luz roja por la clorofila durante la fotosíntesis y la alta reflexión de la radiación infrarroja cercana por la estructura celular de las hojas (Ramirez et al., 2023).

La escala del NDVI se extiende desde -1 hasta +1, proporcionando información valiosa sobre el estado de la superficie terrestre. Los valores cercanos a +1 indican la presencia de vegetación muy densa y saludable, mientras que los valores próximos a 0 corresponden a suelo sin vegetación o vegetación muerta. Por su parte, los valores negativos, que pueden llegar hasta -1, suelen representar superficies como agua, nieve o nubes (Ramirez et al., 2023).

Para calcular el NDVI se emplea una fórmula que relaciona las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo (RED):

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

NIR = Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

RED = Reflectancia en la banda del rojo visible

El **Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI)** es una variante avanzada del NDVI que utiliza la banda verde en lugar de la roja. Su principal característica es una mayor sensibilidad para detectar variaciones de clorofila, siendo especialmente útil para evaluar el estado nutricional de cultivos en etapas avanzadas de crecimiento (Ramirez et al., 2023).

Al igual que el NDVI, su rango de valores oscila entre -1 y +1, donde los valores cercanos a +1 representan vegetación saludable y densa, los próximos a 0 indican escasa cobertura vegetal, y los negativos corresponden a superficies no vegetales. Su cálculo se lleva a cabo a través de (Ramirez et al., 2023):

$$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{GREEN}}{\text{NIR} + \text{GREEN}}$$

NIR = Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

GREEN = Reflectancia en la banda del verde visible

El **Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE)** es un índice espectral diseñado para medir el contenido de clorofila en las plantas, lo que lo convierte en un indicador clave de su salud y estado nutricional. A diferencia del NDVI, el NDRE es más efectivo en cultivos que han alcanzado etapas medias o avanzadas de desarrollo, ya que la luz del borde rojo penetra más profundamente en las hojas, proporcionando una medición más precisa incluso cuando la acumulación de clorofila es alta. El NDRE es particularmente útil para evaluar cultivos densos o con alta biomasa, donde otros índices como el NDVI pueden perder precisión debido a la saturación (Boiarskii & Hasegawa, 2019).

El NDRE oscila entre -1 y +1, siendo los valores más altos, cercanos a +1, los que se representan de color verde e indican una vegetación saludable y vigorosa con alto contenido de clorofila. Los valores intermedios, mostrados en tonos amarillos o verde pálido, sugieren plantas menos saludables o en etapas iniciales de maduración. Por otro lado, los valores bajos, próximos a -1,

se visualizan en colores rojos y señalan suelo desnudo o vegetación muy escasa. Se calcula a través de la siguiente fórmula (Boiarskii & Hasegawa, 2019):

$$\text{NDRE} = \frac{\text{NIR} - \text{Red Edge}}{\text{NIR} + \text{Red Edge}}$$

NIR = Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

Red Edge = Reflectancia en la banda del borde rojo

4.3.3. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó XLSTAT, un software que opera como complemento de Microsoft Excel y que proporciona funcionalidades estadísticas avanzadas, incluyendo análisis descriptivos e inferenciales, modelización predictiva, análisis multivariante, diseño experimental, series temporales y control de calidad (Addinsoft, 2024). La elección de este software permitió realizar todos los análisis requeridos en el estudio de manera eficiente y generar resultados fiables para su posterior interpretación.

5.RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. Resultados de la revisión sistemática

Los resultados de la revisión sistemática muestran la variedad de áreas de estudios, años de publicación, metodología y resultados de los artículos elegidos.

5.1.1. Atendiendo a su distribución

Los 55 artículos seleccionados tras el proceso de la revisión sistemática han sido redactados haciendo referencia a diferentes lugares de estudio en todo el mundo tal y como se recoge en la Figura 18.



Figura 18. Distribución en el mundo de los artículos finales. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la distribución geográfica de las publicaciones científicas sobre alfalfa, derivado de la revisión sistemática realizada, revela que China lidera la publicación de artículos en este campo, seguida por India, mientras que España ocupa la tercera posición en número de publicaciones.

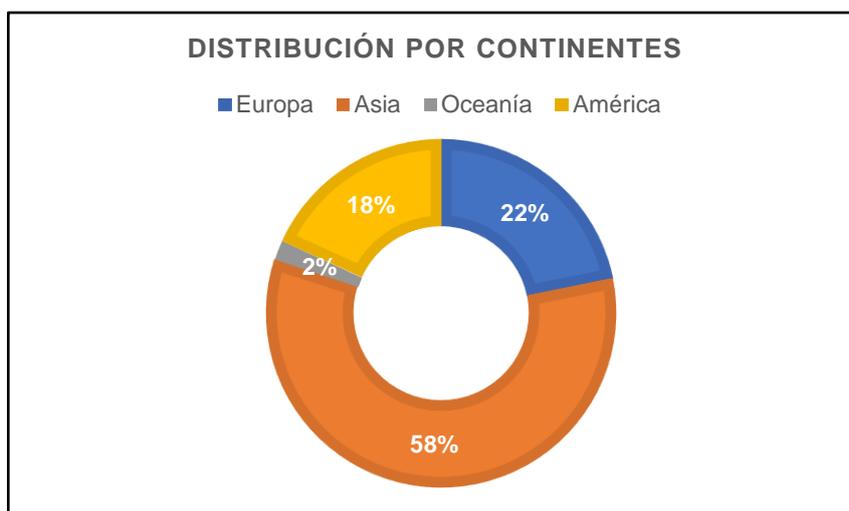


Figura 19. Distribución por continentes de los artículos finales. Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura 19, que recoge la distribución por continentes obtenida de la revisión sistemática, Asia es el continente en el que mayor número de artículos se han redactado seguido de Europa. Oceanía es el continente con menos número de artículos publicados relacionados con la alfalfa y África no presenta ningún artículo publicado en este ámbito.

5.1.2. Atendiendo a los años de publicación

En cuanto a los años de publicación, en la Figura 20 se exponen el número de artículos publicados en cada año desde el 1980 hasta la actualidad.



Figura 20. Distribución de los artículos finales a lo largo del tiempo. Fuente: Elaboración propia.

Se observa como desde el año 1980 hasta el 2010 las publicaciones son muy reducidas, mientras que, a partir del año 2010 el número de artículos publicados varía entre cuatro y siete. Este notable incremento en la producción científica se puede atribuir principalmente a dos factores: por un lado, el significativo aumento en la producción de alfalfa documentado en el estudio del sector productivo, que ha generado mayor interés investigador en este cultivo; y por otro lado, la creciente adopción de drones o vehículos aéreos no tripulados en los últimos años, que ha abierto nuevas posibilidades para el monitoreo y estudio de cultivos. Por tanto, existe una mayor proporción de estudios en la actualidad que en años anteriores, reflejando tanto la expansión del cultivo como la incorporación de nuevas tecnologías en la investigación agrícola.

5.1.3. Atendiendo a la metodología empleada

Las diferentes metodologías utilizadas en los diferentes artículos elegidos en la revisión sistemática y su porcentaje con respecto al total se recogen en la Figura 21.

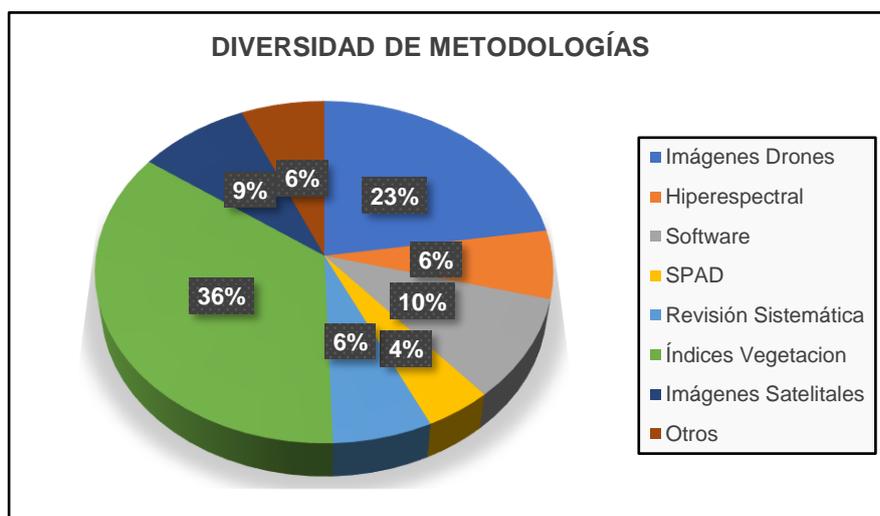


Figura 21. Diversidad de metodologías de los diferentes artículos seleccionados. Fuente: Elaboración propia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

La revisión sistemática de los artículos seleccionados muestra que la metodología más empleada son los Índices de Vegetación (36%), seguida por el uso de Imágenes de Drones (23%). En menor proporción se encuentra el uso de Software (10%), las Imágenes Satelitales (9%), y con una representación del 6% cada una aparecen las tecnologías Hiperespectrales, la Revisión Sistemática y otras metodologías. El SPAD representa la menor proporción con un 4%. Esta distribución refleja la diversidad de enfoques técnicos utilizados en la investigación, con un claro predominio de las tecnologías de teledetección.

Dados los resultados del análisis metodológico, la significativa presencia de imágenes de drones respalda su elección como herramienta viable para la determinación de nitrógeno y clorofila en planta. Si bien el SPAD y la revisión sistemática presentan menores porcentajes de utilización en los estudios analizados, su presencia en la literatura científica confirma su validez y utilidad como metodologías complementarias para estas investigaciones.

Es importante tener en cuenta que esos porcentajes se han obtenido considerando que en varios artículos se combinan varias metodologías distintas.

5.1.4. Atendiendo a los resultados obtenidos

Atendiendo a los resultados de los artículos seleccionados en la revisión sistemática, han sido diversos tal y como se muestra en la Figura 22.

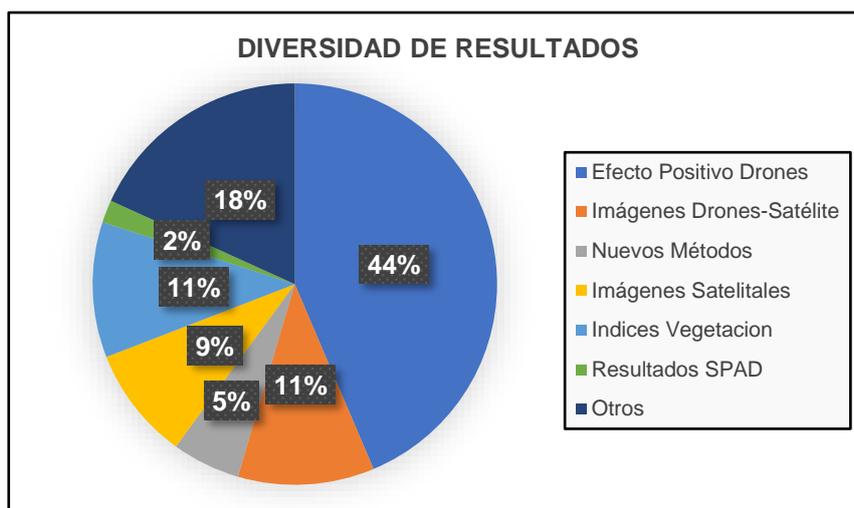


Figura 22. Diversidad de los resultados obtenidos de los artículos seleccionados en la revisión sistemática. Fuente: Elaboración propia.

El Efecto Positivo de los Drones domina claramente los resultados, representando el 44% del total, lo que indica que casi la mitad de los estudios respaldan la efectividad de esta tecnología. En segundo lugar, se encuentra la categoría "Otros" con un 18% de los resultados, seguida por los Índices de Vegetación con un 11%.

Las comparativas entre Imágenes Drones-Satélite también representan un 11% de los resultados, mientras que los Nuevos Métodos constituyen un 9% y las Imágenes Satelitales un 5%. Los Resultados SPAD muestran la menor proporción con solo un 2% del total.

Esta distribución sugiere una fuerte evidencia a favor del uso de drones en la investigación, respaldada por diversos estudios que demuestran resultados positivos en su implementación. También es notable la diversidad de resultados obtenidos, abarcando desde métodos tradicionales hasta nuevas aproximaciones tecnológicas.

5.1.5. Atendiendo a las limitaciones encontradas

En el proceso de la revisión sistemática se han identificado diversas limitaciones relacionadas con la falta de información en aspectos cruciales para el estudio.

En la sección de introducción y definiciones, se identificaron importantes vacíos de información en tres áreas clave: la descripción de las técnicas agronómicas utilizadas en el cultivo de alfalfa, el análisis del contexto actual del cultivo, y la explicación detallada de los principios y aplicaciones de la teledetección.

Respecto a materiales y metodología, se observaron vacíos de información relevantes sobre: las especificaciones de cámaras multiespectrales, la utilización del software NVIVO y la metodología específica de la revisión sistemática.

También se detectó una ausencia notable de fórmulas específicas para dos conversiones importantes:

- La transformación del Índice de Balance de Nitrógeno (obtenido por SPAD) a nitrógeno en planta.
- El cálculo de niveles de clorofila a partir de las imágenes captadas por drones.

5.1.6. Atendiendo a las conclusiones de los estudios

Dentro de las conclusiones, algunos autores detectaron que los índices de vegetación presentaban una menor sensibilidad ante la variación de la composición del suelo cuando el Índice de Área Foliar (LAI) es mayor que tres (Fu et al., 2013).

Otros autores han llegado a desarrollar un dron capaz de reconstruir líneas de nubes de puntos densas para procesar posteriormente en un mapa 3D de índices de vegetación (Ramírez et al., 2023).

Para el monitoreo de la fenología se ha demostrado que el índice de clorofila o carotenoides (CCI) podría reproducirse mediante bandas anchas verdes y rojas a través de las imágenes de drones (Yin et al., 2022).

Otras conclusiones recogían que el Índice de Vegetación de Clorofila (CVI) puede emplearse como estimador de clorofila foliar para cultivos planófilos, es decir, que presentan sus hojas con una disposición horizontal como la soja o el girasol (Vincini et al., 2008).

Otras investigaciones demostraron que el método de bandas RGB logró resultados muy precisos para determinar índices de vegetación y estimación de nutrientes en plantas (Hashim et al., 2021).

Otro estudio identificó las cámaras RGB como una alternativa económica, aunque con la limitación de recopilar menos datos. Para superar este desafío, se desarrolló un nuevo Índice de Vegetación Visible, diseñado para obtener índices de vegetación a partir de los mapas generados por este tipo de imágenes. (Costa et al., 2020).

El dron con cámara multiespectral es eficaz para capturar imágenes y obtener datos precisos del dosel vegetal a gran escala en tiempo real. Se propone optimizar su potencial mediante mejoras como sensores para medir radiación solar específica y perfeccionar calibración y procesamiento (Geipel et al., 2016).

En el monitoreo de la vegetación mediante técnicas de teledetección satelital, es inevitable la presencia de un cierto nivel de ruido. Por ello, es fundamental tener en cuenta tanto la "susceptibilidad" del índice de vegetación a este ruido como su capacidad para representar con precisión los fenómenos objetivo (Sasagawa et al., 2022).

En otros artículos se determinó que el uso de sensores remotos satelitales tiene limitaciones, como restricciones de uso, alto costo, baja frecuencia de visitas y resolución limitada. A pesar de que los vehículos aéreos no tripulados (UAV) surgen como una alternativa prometedora para la agricultura de precisión, es esencial que los gobiernos implementen medidas para educar a los agricultores sobre estas tecnologías y fortalecer sus capacidades para satisfacer las necesidades del sector (Bansod et al., 2017).

5.2. Resultados con instrumentos de medida en campo

5.2.1. Resultados con SPAD

Durante el muestreo en la parcela de alfalfa, se tomaron 4 mediciones por punto y fecha usando el SPAD. Aunque el dispositivo registró datos de clorofila, nitrógeno, flavonoides y antocianinas (almacenados en Excel como se muestra en la Tabla 10), el análisis se centrará únicamente en los valores de nitrógeno y clorofila. Estos parámetros serán posteriormente correlacionados con los índices de vegetación derivados de las imágenes capturadas por el dron.

Tabla 10. Ejemplo de los datos tomados en campo por el SPAD en dos puntos diferentes en la fecha del 16/05/2024. Fuente: Elaboración propia.

16/05/2024	SPAD	Planta 1		Planta 2	
		Hoja baja	Hoja alta	Hoja baja	Hoja alta
Punto 1	NBI	10,1	12,8	18,9	16,4
	Chl	10,3	13,9	28,0	18,6
	Flav	1,02	1,09	1,48	1,14
	Anth	0,29	0,27	0,17	0,24
Punto 2	NBI	27,6	16,9	21,0	19,7
	Chl	37,1	24,8	30,0	28,8
	Flav	1,34	1,47	1,43	1,46
	Anth	0,13	0,20	0,18	0,19

NBI = Índice de Balance de Nitrógeno; Chl = Clorofila; Flav = Flavonoides; Anth = Antocianinas

5.2.2. Resultados con imágenes de dron

Los índices de vegetación de cada punto de muestreo fueron generados a través de las ortofotos obtenidas mediante Pix4Dmapper, procesando las imágenes capturadas por el dron DJI Mavic 3M durante las mediciones con SPAD.

Tras obtener los valores de los índices en cada punto, se calculó un promedio para simplificar todos los datos de cada índice en un único valor por punto y fecha, resultando en 10 valores por índice para cada fecha. Algunos de estos valores se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Ejemplo de los resultados de los índices de vegetación en el segundo muestreo (23/05/24) obtenidos mediante Pix4Dmapper.

PUNTO	NDVI	GNDVI	NDRE
1	0,77805422	0,69404987	0,15219903
2	0,76998060	0,67795803	0,15028414
3	0,75673554	0,68270516	0,14690273
4	0,62835018	0,61323948	0,12169500
5	0,46073433	0,48894544	0,07017159
6	0,78408910	0,67905759	0,14662035
7	0,74657423	0,67709141	0,17700406
8	0,76692356	0,68767116	0,14840673
9	0,68492585	0,64609186	0,12433842
10	0,81907296	0,71594066	0,20719926

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

GNDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde

NDRE = Diferencia Normalizada del Borde Rojo

5.3. Resultados de laboratorio

Para aportar más información a las mediciones de campo obtenidas con el SPAD y mediante teledetección con drones, se realizaron análisis de laboratorio en el Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario (ITAGRA.CT) de las hojas obtenidas en la última fecha de muestreo correspondiente con la fase de fructificación. Estos análisis determinaron el contenido de proteína bruta (PB) sobre materia seca, cuyos resultados se presentan en la Tabla 12. A partir de estos valores de proteína bruta, se calculó el contenido de nitrógeno utilizando el factor de conversión 1/6,25, que es el recomendado para el cultivo de alfalfa.

Tabla 12. Análisis de laboratorio de la proteína bruta sobre materia seca del cultivo de alfalfa en la última fecha de muestreo. Fuente: ITAGRA.CT.

	% PB (sms)	% HUMEDAD	% NITRÓGENO
PUNTO 1	18,81	85,19	3,01
PUNTO 2	22,62	89,97	3,62
PUNTO 3	22,06	86,44	3,53
PUNTO 4	22,62	84,71	3,62
PUNTO 5	21,12	89,41	3,38
PUNTO 6	20,31	87,93	3,25
PUNTO 7	21,37	87,34	3,42
PUNTO 8	23,75	91,11	3,80
PUNTO 9	23,44	88,47	3,75
PUNTO 10	22,12	89,13	3,54

Los datos obtenidos se correlacionarán con los índices definidos anteriormente, con el objetivo de evaluar la correspondencia entre los valores reales y las mediciones realizadas en campo.

5.4. Correlación entre los índices de vegetación y el nitrógeno y la clorofila

5.4.1. Correlación con datos de instrumentos de campo

Una vez completada la recolección de datos del SPAD y el procesamiento de las imágenes capturadas por el dron, se procederá a realizar un análisis correlacional. Este análisis comparará los diversos índices de vegetación con los niveles de nitrógeno y clorofila medidos. Esto permitirá determinar cuál de los tres índices de vegetación evaluados demuestra mayor eficacia y precisión para predecir la concentración de estos nutrientes esenciales utilizando técnicas de teledetección con drones.

Primeramente, se analiza la evolución del nitrógeno y la clorofila medidos mediante el SPAD en la parcela de alfalfa objeto de estudio representada para la parte alta en la Figura 23 y para la parte baja en la Figura 24. En ambas partes se observa que los valores de nitrógeno se mantuvieron, en general, por debajo de los niveles de clorofila.

La parte alta mantuvo niveles más estables de nitrógeno a lo largo del ciclo, oscilando entre 21 y 23, lo que indica que el cultivo no experimentó deficiencias significativas de este nutriente en ningún momento. En contraste, en la parte baja de la parcela, el contenido de nitrógeno mostró una tendencia ascendente inicial, alcanzando su punto máximo de aproximadamente 22 el 23 de mayo durante la segunda medición. Posteriormente, se observó un descenso gradual que culminó en una disminución pronunciada.

La evolución de los niveles de clorofila mostró un patrón dinámico tanto en la parte alta como en la parte baja del cultivo. Inicialmente, se observó un incremento que alcanzó su punto máximo de 30 el 23 de mayo. Tras alcanzar este pico, los valores experimentaron una caída en la siguiente medición, seguida de una fase de recuperación. Es notable destacar que estos cambios fueron más pronunciados en la zona baja del cultivo, donde las fluctuaciones se manifestaron de manera más abrupta.

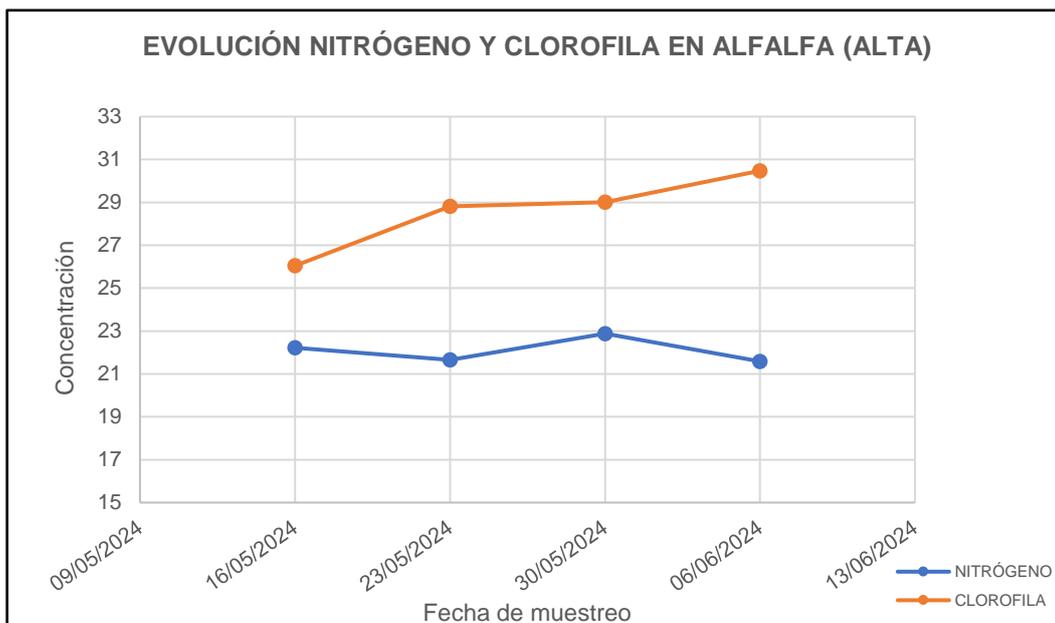


Figura 23. Evolución del nitrógeno y la clorofila medido mediante el SPAD en la parte alta del cultivo de la alfalfa a lo largo de su ciclo. Fuente: Elaboración propia.

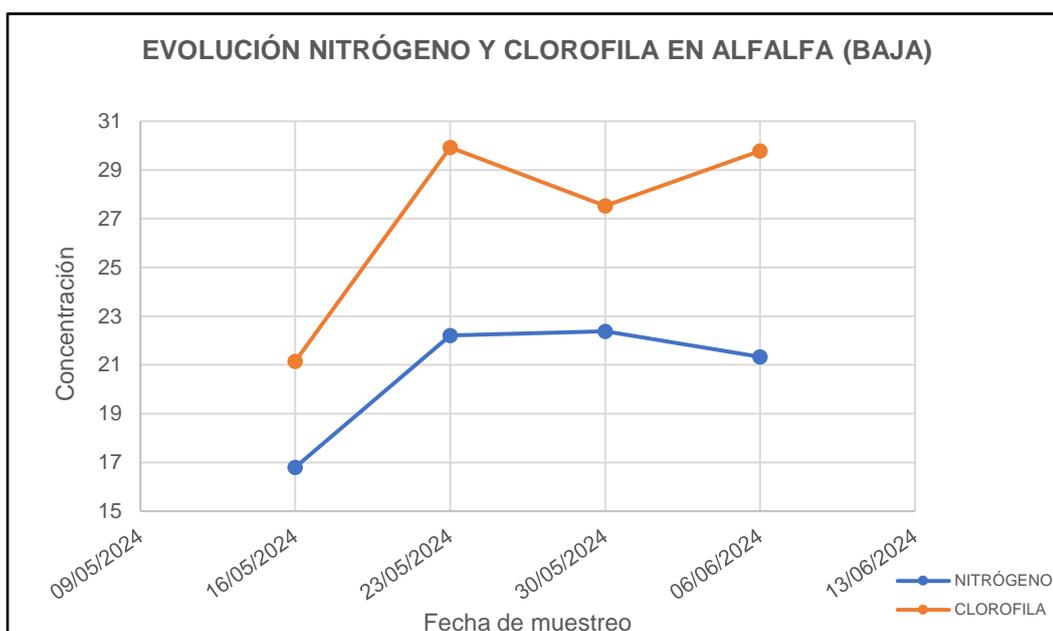


Figura 24. Evolución del nitrógeno y la clorofila medido mediante el SPAD en la parte baja del cultivo de la alfalfa a lo largo de su ciclo. Fuente: Elaboración propia.

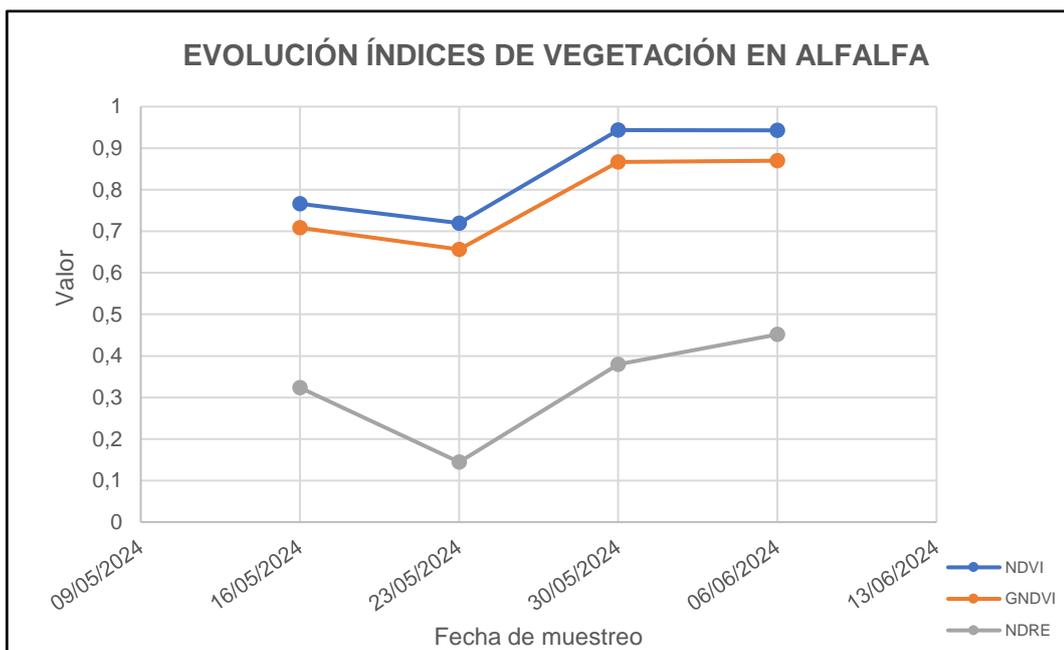


Figura 25. Evolución de los índices de vegetación obtenidos a través de la teledetección con drones en el cultivo de la alfalfa a lo largo de su ciclo. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 25 ilustra la evolución de los diferentes índices de vegetación durante el ciclo de la alfalfa. Los resultados muestran que el NDRE presentó valores considerablemente más bajos que el NDVI y el GNDVI. Estos dos últimos índices mostraron patrones de evolución prácticamente idénticos, aunque el GNDVI mantuvo valores ligeramente inferiores. Ambos índices experimentaron inicialmente un descenso, seguido de un leve incremento, para finalmente estabilizarse en un rango entre 0,65 y 0,95. El NDRE, por su parte, mostró un comportamiento diferente, caracterizado por una disminución inicial hasta el 23 de mayo, seguida de un aumento gradual, manteniéndose en un rango entre 0,3 y 0,45. La evolución seguida por los índices en ambas partes del cultivo ha sido semejante.

A continuación, se procede a realizar un análisis estadístico exhaustivo de los datos recopilados con XLSTAT, comenzando con la determinación de la distribución estadística que caracteriza al conjunto de datos obtenidos. Este paso inicial es fundamental para seleccionar las pruebas estadísticas más apropiadas en los análisis posteriores.

Se realizaron cuatro **pruebas de normalidad** (Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, Lilliefors y Jarque-Bera) para evaluar la distribución de los valores de nitrógeno, clorofila e índices de vegetación, diferenciando entre las parte alta y baja en cada punto y fecha de muestreo.

Los resultados finales de las cuatro pruebas de normalidad se presentan de manera resumida en la Tabla 13, considerando como "aceptadas" aquellas variables que siguen una distribución normal en una fecha específica. Por otro parte, los resultados completos se recogen en la Tabla 19 del ANEXO I. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ESTADÍSTICAS para la parte superior del cultivo y en la Tabla 20 del mismo anexo para la parte inferior.

Como se observa en la siguiente tabla, las pruebas de normalidad son válidas en todas las fechas excepto en el 23 de mayo, por lo que todas las variables tanto para la parte alta del cultivo como para la parte baja exceptuando esa fecha siguen una distribución normal.

Tabla 13. Resumen del resultado final de las pruebas de normalidad realizadas con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia.

Pruebas de Normalidad			
ALTA		BAJA	
16/05/2024	ACEPTADA	16/05/2024	ACEPTADA
23/05/2024	NO ACEPTADA	23/05/2024	NO ACEPTADA
30/05/2024	ACEPTADA	30/05/2024	ACEPTADA
06/06/2024	ACEPTADA	06/06/2024	ACEPTADA

Por tanto, el primer análisis estadístico es a través de la prueba de **Pearson** que es una medida estadística que evalúa la relación lineal entre dos variables cuantitativas continuas, oscilando entre -1 y +1, donde 0 indica ausencia de correlación. Para su aplicación, es fundamental que los datos cumplan tres requisitos básicos: sean variables cuantitativas continuas, presenten una distribución normal y mantengan una relación lineal (Schober et al., 2018). Se considera que la correlación es significativa a partir del valor de 0,75.

Esta prueba ha sido aplicada para todas las fechas excepto para la del 23 de mayo dado que los datos no siguen una distribución normal. Los resultados relevantes de esta prueba se recogen en la Tabla 14.

Como se puede observar en la siguiente tabla, extraída de la Tabla 21 del ANEXO I. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ESTADÍSTICAS las correlaciones significativas se concentran exclusivamente en la parte superior del cultivo, lo cual refleja la mayor capacidad del dron para detectar esta zona en comparación con la parte baja. El último muestreo, realizado el 6 de junio en la fase de fructificación, mostró correlaciones particularmente robustas en la parte alta entre el contenido de clorofila y dos índices espectrales: el NDVI (0,817) y el GNDVI (0,844). En contraste, la parte baja del cultivo no presentó correlaciones significativas.

Tabla 14. Resultados relevantes de la prueba estadística de Pearson con XLSTAT del cultivo de alfalfa de la parcela objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia.

ALTA		
06/06/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,422	0,817
GNDVI	0,274	0,844
NDRE	0,185	0,604

Dado que estos resultados no resultan muy concluyentes se realiza la prueba de **Spearman** que se trata de una prueba estadística que mide la relación entre dos variables cuando los datos no son normales o son de una cantidad reducida. El coeficiente va de -1 a +1, donde los valores negativos indican relación inversa y los positivos relación directa. Se usa principalmente cuando trabajamos con datos que no cumplen los supuestos para usar la correlación de Pearson o cuando tenemos valores extremos que podrían afectar los resultados (Zar, 2014). Por estos motivos, esta prueba se ha aplicado a todas las variables en todas las fechas.

Los resultados relevantes de esta prueba se recogen en la Tabla 15, extraída de la Tabla 22 del ANEXO I. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ESTADÍSTICAS observándose como existe en la fase del botón floral de la alfalfa (23 de mayo) una correlación inversa entre el nitrógeno y el NDRE con un valor de -0,648 y una correlación directa en la fase de fructificación entre el NDVI y el GNDVI con la clorofila de valores de 0,863 y 0,754 respectivamente. Sin embargo, en la parte baja no existe ninguna correlación.

Tabla 15. Resultados de la prueba estadística de Spearman con XLSTAT del cultivo de alfalfa de la parcela objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia.

ALTA		
23/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	-0,467	-0,042
GNDVI	-0,455	-0,261
NDRE	-0,648	-0,406
06/06/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,406	0,863
GNDVI	0,418	0,754
NDRE	0,127	0,334

Finalmente, para averiguar si existían más correlaciones, se ha realizado una **Regresión No Paramétrica** (RNP) evaluando estas variables. Se trata de una técnica estadística que modela relaciones entre variables sin asumir una forma específica (como lineal o cuadrática). Se usa cuando los datos no cumplen supuestos básicos como normalidad o cuando la relación entre variables es compleja y no puede ser explicada por modelos tradicionales (Härdle et al., 2012). De esta forma, esta prueba se ha aplicado a todas las variables en todas las fechas. Se consideran correlaciones moderadamente fuertes con valores comprendidos entre 0,3 y 0,7.

Los resultados del cultivo de alfalfa se recogen en la Tabla 16. En la parte alta se observa una relación directa entre el nitrógeno y la clorofila con en el NDRE en la fecha del 16 de mayo durante la fase vegetativa. El 23 de mayo durante la fase de botón floral como se ha comprobado en pruebas anteriores, existe una relación inversa entre el nitrógeno y el NDRE. En la del 30 de mayo durante la fase de floración se observa correlaciones directas entre el nitrógeno y la clorofila con el NDVI y el NDRE siendo ligeramente superior en el caso del NDVI. Y en el último muestreo en plena fructificación se observan fuertes correlaciones entre la clorofila y los tres índices siendo ligeramente superior la del GNDVI además de una correlación directa entre el nitrógeno y el NDVI.

En la parte baja se observan menos correlaciones entre las que se recogen la correlación directa entre la clorofila y el NDRE en los dos primeros muestreos. En la fecha del 30 de mayo existe una correlación directa entre el nitrógeno y el NDVI y el NDRE. Por último, en la fecha del 6 de junio se observa una relación directa entre el nitrógeno y los índices NDVI y GNDVI.

Tabla 16. Resultados de la prueba estadística de Regresión No Paramétrica para las diferentes variables en todas las fechas del cultivo de alfalfa con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia.

ALTA			BAJA		
16/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	16/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,125	-0,266	NDVI	-0,160	0,010
GNDVI	0,118	0,001	GNDVI	0,130	0,272
NDRE	0,355	0,363	NDRE	0,208	0,386
23/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	23/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	-0,243	-0,183	NDVI	0,263	0,251
GNDVI	-0,202	-0,247	GNDVI	0,232	0,217
NDRE	-0,496	-0,121	NDRE	0,108	0,304
30/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	30/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,392	0,469	NDVI	0,385	0,282
GNDVI	0,113	0,183	GNDVI	0,174	0,297
NDRE	0,304	0,301	NDRE	0,356	0,178
06/06/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	06/06/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,422	0,817	NDVI	0,378	0,136
GNDVI	0,274	0,844	GNDVI	0,339	0,163
NDRE	0,185	0,604	NDRE	0,152	0,108

En resumen, la parte superior del cultivo mantuvo niveles más estables de nitrógeno y clorofila durante todo el ciclo en comparación a la parte inferior, debido al efecto sombra que experimenta. Los índices de vegetación mostraron patrones distintivos, con NDVI y GNDVI presentando evoluciones similares, mientras que el NDRE mostró valores significativamente más bajos. Las

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

correlaciones más significativas se concentraron en la parte alta del cultivo, donde se observó una correlación inversa entre el nitrógeno y el NDRE durante la fase de botón floral, y correlaciones directas entre la clorofila y los índices NDVI y GNDVI durante la fase de fructificación. La parte baja del cultivo mostró correlaciones menos pronunciadas pero significativas, principalmente entre la clorofila y el NDRE en los primeros muestreos, y entre el nitrógeno y los índices NDVI y GNDVI en la fase final.

5.4.2. Correlación con datos obtenidos del laboratorio

El primer paso es comprobar el tipo de distribución que siguen los datos de nitrógeno obtenidos en el laboratorio. Para ello, como se ha hecho anteriormente, utilizando el XLSTAT se realizan las cuatro pruebas de normalidad ya mencionadas y se obtienen los resultados de la Tabla 17.

Tabla 17. Pruebas de normalidad con XLSTAT del nitrógeno obtenido del análisis de laboratorio de ITAGRA.CT. Fuente: Elaboración propia.

06/06/2024	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
NITRÓGENO	0,685	0,689	0,628	0,679

Como se muestra en la tabla anterior, los datos de nitrógeno obtenidos del laboratorio siguen una distribución normal. Por tanto, se realizan las pruebas estadísticas de Pearson, Spearman y la Regresión No Paramétrica resumiéndose los resultados en la Tabla 18.

Tabla 18. Resultados de las diferentes pruebas estadísticas del nitrógeno obtenido del análisis de laboratorio de ITAGRA.CT con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia.

06/06/2024	NITRÓGENO		
	Pearson	Spearman	RNP
NDVI	0,035	0,134	0,035
GNDVI	0,095	0,006	0,095
NDRE	0,107	0,316	0,107

A partir de la Tabla 18, estas pruebas demuestran que no existen correlaciones entre el nitrógeno obtenido del laboratorio con los tres índices de vegetación empleados.

6.CONCLUSIONES.

Tras el análisis exhaustivo de los datos obtenidos mediante teledetección con drones y su comparación con técnicas convencionales para la determinación de nitrógeno y clorofila en el cultivo de alfalfa, se han alcanzado las siguientes conclusiones significativas:

- Analizando la evolución de los nutrientes en la alfalfa, se observa que los valores de nitrógeno en la parte inferior del cultivo son menores debido a la influencia del efecto sombra de la parte superior, lo que reduce la captación de energía solar, nutrientes y el proceso de fotosíntesis.
- Tras las pruebas estadísticas de Pearson, Spearman y de Regresión No Paramétrica se ha demostrado una mayor precisión en la detección de correlaciones en la parte superior del cultivo en comparación con la parte inferior, lo cual se atribuye a la mejor capacidad de observación del dron en las zonas elevadas del cultivo.
- La efectividad de los diferentes índices de vegetación obtenidos en los ortomosaicos generados mediante el sensor multiespectral aerportado en el dron, varía según el estado fenológico del cultivo, lo que subraya la importancia de seleccionar índices específicos para cada etapa de desarrollo.
 - Durante la fase vegetativa, el índice NDRE demuestra ser adecuado para la estimación de la clorofila debido a la correlación directa existente entre ellos.
 - Durante la fase de botón floral, el índice NDRE mantiene una correlación inversa significativa con los niveles de nitrógeno, estableciéndose como un buen indicador del mismo, lo cual se confirmó consistentemente a través de múltiples análisis estadísticos.
 - En la etapa de floración, existe una relación directa entre los valores de nitrógeno y los índices NDVI y NDRE, lo que los convierte en posibles estimadores de este nutriente durante esta etapa del ciclo.
 - Durante la etapa de fructificación, se evidenció una correlación altamente significativa entre el contenido de clorofila y los índices de vegetación NDVI y GNDVI, lo que sugiere la particular relevancia de estos indicadores como estimadores de clorofila durante esta fase específica del desarrollo del cultivo. El NDRE también mostró correlaciones, aunque más ligeras.
- Una limitación importante del estudio fue la corta duración del ciclo de la alfalfa, lo que señala la necesidad futura de realizar muestreos a lo largo de múltiples ciclos para obtener resultados más robustos y conclusivos.
- La revisión sistemática ha reflejado la falta de estudios con el cultivo de la alfalfa siendo así el mismo una base para próximas investigaciones teniendo en cuenta aspectos como:
 - Utilizar cámaras multiespectrales que exploren otras longitudes de onda que permitan calcular otros índices de vegetación.
 - Explorar la aplicabilidad de índices de vegetación alternativos o novedosos.
 - Realizar estudios con otros cultivos de ciclos más largos que permitan más cantidad de muestreos.

7. ANEXOS.

ANEXO I. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ESTADÍSTICAS

Se realizó un análisis estadístico con XLSTAT de los datos de muestreo, diferenciando entre la parte alta y baja del cultivo de alfalfa además de por fecha. Para verificar la distribución de los datos, se aplicaron cuatro pruebas de normalidad en cada fecha, tanto para la parte alta (Tabla 19) como para la parte baja del cultivo de alfalfa (Tabla 20).

En las tablas, los valores en negrita y subrayados en rojo indican el incumplimiento de las pruebas de normalidad. Se consideran datos con distribución normal cuando al menos dos de las pruebas de normalidad resultan válidas.

Tabla 19. Pruebas de normalidad con XLSTAT de las variables a tener en cuenta de la parte alta del cultivo de alfalfa. Fuente: Elaboración propia.

16/05/2024	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
NITRÓGENO	0,273	0,315	0,179	0,634
CLOROFILA	0,673	0,669	0,750	0,827
NDVI	0,097	0,053	0,030	0,494
GNDVI	0,646	0,800	0,806	0,703
NDRE	0,547	0,633	0,760	0,737
23/05/2024	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
NITRÓGENO	0,448	0,327	0,111	0,704
CLOROFILA	0,865	0,820	0,472	0,802
NDVI	0,008	0,009	0,011	0,066
GNDVI	0,002	0,002	0,003	0,013
NDRE	0,384	0,160	0,167	0,832
30/05/2024	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
NITRÓGENO	0,863	0,939	0,999	0,764
CLOROFILA	0,563	0,510	0,706	0,545
NDVI	0,018	0,027	0,078	0,104
GNDVI	0,925	0,869	0,897	0,903
NDRE	0,644	0,764	0,877	0,773
06/06/2024	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
NITRÓGENO	0,954	0,853	0,640	0,902
CLOROFILA	0,191	0,087	0,188	0,633
NDVI	0,216	0,279	0,265	0,485
GNDVI	0,034	0,059	0,102	0,070
NDRE	0,071	0,094	0,099	0,277

Tabla 20. Pruebas de normalidad con XLSTAT de las variables a tener en cuenta de la parte baja del cultivo de alfalfa. Fuente: Elaboración propia.

16/05/2024	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
NITRÓGENO	0,088	0,091	0,092	0,343
CLOROFILA	0,424	0,472	0,686	0,688
NDVI	0,097	0,053	0,030	0,494
GNDVI	0,646	0,800	0,806	0,703
NDRE	0,547	0,633	0,760	0,737
23/05/2024	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
NITRÓGENO	0,336	0,452	0,714	0,617
CLOROFILA	0,680	0,522	0,513	0,865
NDVI	0,008	0,009	0,011	0,066
GNDVI	0,002	0,002	0,003	0,013
NDRE	0,384	0,160	0,167	0,832
30/05/2024	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
NITRÓGENO	0,555	0,372	0,084	0,715
CLOROFILA	0,033	0,051	0,110	0,297
NDVI	0,018	0,027	0,078	0,104
GNDVI	0,925	0,869	0,897	0,903
06/06/2024	Shapiro-Wilk	Anderson-Darling	Lilliefors	Jarque-Bera
NITRÓGENO	0,996	0,980	0,994	0,895
CLOROFILA	0,068	0,059	0,098	0,548
NDVI	0,216	0,279	0,265	0,485
GNDVI	0,034	0,059	0,102	0,070
NDRE	0,071	0,094	0,099	0,277

Los resultados indican que los índices NDVI y GNDVI medidos el 23 de mayo no presentan una distribución normal, tanto en la zona alta como en la baja del cultivo. El resto de los datos analizados sí se ajustan a una distribución normal.

Para evaluar las correlaciones entre variables, se aplicó la prueba de Pearson a todos los datos excepto los correspondientes al 23 de mayo, ya que estos últimos no cumplían con el requisito de normalidad. Los resultados del análisis de correlación para el cultivo completo se presentan en la Tabla 21, donde se han destacado en negrita y verde las correlaciones estadísticamente significativas.

Tabla 21. Resultados de la prueba estadística de Pearson para las diferentes variables de los muestreos del cultivo de alfalfa con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia.

	ALTA		BAJA	
16/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,125	-0,266	-0,160	0,010
GNDVI	0,118	0,001	0,130	0,272
NDRE	0,355	0,363	0,208	0,386
30/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,392	0,469	0,385	0,282
GNDVI	0,113	0,183	0,174	0,297
NDRE	0,304	0,301	0,356	0,178
06/06/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,422	0,817	0,378	0,136
GNDVI	0,274	0,844	0,339	0,163
NDRE	0,185	0,604	0,152	0,108

El análisis de correlación de Pearson reveló un patrón interesante en la distribución espacial de las relaciones entre variables. Las correlaciones significativas se encontraron únicamente en la parte superior del cultivo, lo que sugiere una mayor eficacia del dron para captar información en esta zona. Particularmente notable fue el muestreo del 6 de junio, donde se observaron fuertes correlaciones en la zona alta entre el contenido de clorofila y los índices espectrales NDVI (0,817) y GNDVI (0,844). La parte baja del cultivo, en cambio, no mostró correlaciones significativas.

Tabla 22. Resultados de la prueba estadística de Spearman para las diferentes variables de los muestreos del cultivo de alfalfa con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia.

	ALTA		BAJA	
16/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,188	-0,285	-0,139	-0,212
GNDVI	0,224	0,067	0,309	0,285
NDRE	0,491	0,394	0,430	0,406
23/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	-0,467	-0,042	0,491	0,608
GNDVI	-0,455	-0,261	0,261	0,322
NDRE	-0,648	-0,406	0,006	0,182
30/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,152	0,018	0,321	0,515
GNDVI	0,091	-0,067	0,309	0,503
NDRE	0,321	0,164	0,515	0,467
06/06/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,406	0,863	0,418	0,152
GNDVI	0,418	0,754	0,309	-0,067
NDRE	0,127	0,334	-0,018	-0,200

Posteriormente, se aplicó la prueba de Spearman a todas las fechas, ya que esta prueba es apropiada tanto para conjuntos de datos pequeños como para aquellos que no siguen una distribución normal. Los resultados, presentados en la Tabla 22, revelaron patrones adicionales de correlación. En la parte alta del cultivo, se identificó una correlación negativa significativa entre el nitrógeno y el NDRE (-0,648), así como correlaciones positivas entre el contenido de clorofila y los

índices NDVI (0,863) y GNDVI (0,754). En contraste, la parte baja del cultivo no presentó correlaciones significativas en ninguna de las variables analizadas.

Para explorar la posible existencia de relaciones adicionales entre las variables, se llevó a cabo un análisis de regresión no paramétrica. Los coeficientes de correlación resultantes de este análisis se presentan en la Tabla 23, donde se han resaltado en negrita y verde las correlaciones que alcanzaron significación estadística.

Tabla 23. Resultados de la prueba estadística de Regresión No Paramétrica para las diferentes variables de los muestreos del cultivo de alfalfa con XLSTAT. Fuente: Elaboración propia.

	ALTA		BAJA	
	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
16/05/2024				
NDVI	0,125	-0,266	-0,160	0,010
GNDVI	0,118	0,001	0,130	0,272
NDRE	0,355	0,363	0,208	0,386
23/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	-0,243	-0,183	0,263	0,251
GNDVI	-0,202	-0,247	0,232	0,217
NDRE	-0,496	-0,121	0,108	0,304
30/05/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,392	0,469	0,385	0,282
GNDVI	0,113	0,183	0,174	0,297
NDRE	0,304	0,301	0,356	0,178
06/06/2024	NITRÓGENO	CLOROFILA	NITRÓGENO	CLOROFILA
NDVI	0,422	0,817	0,378	0,136
GNDVI	0,274	0,844	0,339	0,163
NDRE	0,185	0,604	0,152	0,108

Los resultados de la regresión no paramétrica revelaron patrones de correlación diferenciados entre las zonas alta y baja del cultivo a lo largo de las distintas fechas de muestreo. En la parte alta del cultivo, el muestreo del 16 de mayo mostró una correlación positiva entre el NDRE y los niveles de nitrógeno y clorofila. Para el 23 de mayo, se confirmó la relación inversa entre el nitrógeno y el NDRE, un hallazgo que ya se había observado en análisis anteriores.

Continuando con la zona alta, el muestreo del 30 de mayo evidenció correlaciones positivas del NDVI y NDRE tanto con el nitrógeno como con la clorofila, siendo estas correlaciones ligeramente más pronunciadas en el caso del NDVI. El último muestreo, realizado el 6 de junio, reveló correlaciones positivas intensas entre la clorofila y los tres índices espectrales, destacando el GNDVI con la correlación más fuerte. Además, en esta fecha también se identificó una correlación positiva entre el nitrógeno y el NDVI.

En cuanto a la parte baja del cultivo, se observaron menos correlaciones en general. Durante los dos primeros muestreos (16 y 23 de mayo), se identificó una correlación positiva entre la clorofila y el NDRE. El muestreo del 30 de mayo mostró correlaciones positivas entre el nitrógeno y ambos índices NDVI y NDRE. Finalmente, en el último muestreo del 6 de junio, se encontraron correlaciones positivas entre el nitrógeno y los índices NDVI y GNDVI.

BIBLIOGRAFÍA.

Acosta, M. B. (2020). *Qué es la clorofila y sus tipos*. Ecologiaverde.com. <https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-clorofila-y-sus-tipos-2579.html>

Acosta, M. B. (2024). *Fotosíntesis: qué es, fases e importancia*. Ecologiaverde.com. <https://www.ecologiaverde.com/fotosintesis-que-es-fases-e-importancia-2948.html>

Addinsoft. (2024). *XLSTAT statistical and data analysis solution*. Paris, France. <https://www.xlstat.com>

Annicchiarico, P. et al. (2011). Adaptation of landrace and variety germplasm and selection strategies for lucerne in the Mediterranean basin. *Field Crops Research*, 120(2), 283–291.

Baixauli, H. (2021). *Alfalfa: plagas y enfermedades (octubre 2021)*. Phytoma.com. <https://www.phytoma.com/sanidad-vegetal/avisos-de-plagas/alfalfa-plagas-y-enfermedades-septiembre-2021>

Bansod, B., Singh, R., Thakur, R., & Singhal, G. (2017). A comparison between satellite based and drone based remote sensing technology to achieve sustainable development: A review. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 111(2), 383–407.

Barnes, D. K. (2015). Alfalfa. En *Hybridization of Crop Plants* (pp. 177–187). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America.

Bi, K., Gao, S., Niu, Z., Zhang, C., & Huang, N. (2019). Estimating leaf chlorophyll and nitrogen contents using active hyperspectral LiDAR and partial least square regression method. *Journal of applied remote sensing*, 13(03), 1. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.13.034513>

Boegh, E., Soegaard, H., Broge, N., Hasager, C. B., Jensen, N. O., Schelde, K., & Thomsen, A. (2002). Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 179–193. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(01\)00342-x](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00342-x)

Boiarskii, B., & Hasegawa, H. (2019). Comparison of NDVI and NDRE indices to detect differences in vegetation and chlorophyll content. *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences*, 1(4). <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>

Broge, N. H., Thomsen, A. G., & Andersen, P. B. (2003). Comparison of selected vegetation indices as indicators of crop status. En *Geoinformation for european-wide integration* (pp. 591–596).

Cabrales, R. A. (2023, febrero 8). *¿Por qué consumir clorofila de alfalfa?* Millenium Natural Systems. <https://sistemanatural.com/por-que-consumir-clorofila-de-alfalfa/>

Campo Digital. (2023, junio 9). *La importancia de las cámaras multiespectrales en la agricultura*. Campo Digital. <https://campodigital.es/la-importancia-de-las-cameras-multiespectrales-en-la-agricultura/>

Carmona, F., Rivas, R., & Fonnegra, D. C. (2015). Vegetation Index to estimate chlorophyll content from multispectral remote sensing data. *European journal of remote sensing*, 48(1), 319–326. <https://doi.org/10.5721/eujrs20154818>

Castilho, D., Tedesco, D., Hernandez, C., Madari, B. E., & Ciampitti, I. (2024). A global dataset for assessing nitrogen-related plant traits using drone imagery in major field crop species. *Scientific Data*, 11(1), 585. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03357-2>

Celsius Panel. (2020). *¿Qué son los infrarrojos?* Celsius Panel. <https://www.celsiuspanel.it/es/que-son-los-infrarrojos/>

Cherlinka, V. (2024, enero 18). Cultivo De Alfalfa: Siembra, Cuidado Y Cosecha Productivas. *EOS Data Analytics*. <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-alfalfa/>

Chikr El-Mezouar, M., Taleb, N., Kpalma, K., & Ronsin, J. (2010). A high-resolution index for vegetation extraction in IKONOS images. En C. M. U. Neale & A. Maltese (Eds.), *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XII*. SPIE.

Costa, L., Nunes, L., & Ampatzidis, Y. (2020). A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172(105334), 105334. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105334>

Cui, S., & Zhou, K. (2017). A comparison of the predictive potential of various vegetation indices for leaf chlorophyll content. *Earth science informatics*, 10(2), 169–181. <https://doi.org/10.1007/s12145-016-0281-3>

Delgado, I., & Muñoz, F. (2005). *La fertilización nitrogenada en el cultivo de la alfalfa*.

Díaz San Andrés, A. (2019). *Climodiagramas*. Biogeografia.net. <https://biogeografia.net/bioclima04.html>

Dintén, Á. (2020). *Drones y cámara multiespectral*. Hito1. <https://www.hito1.es/drones/drones-y-camara-multiespectral/>

DJI. (2024). *DJI Mavic 3M - specifications*. DJI. <https://aq.dji.com/es/mavic-3-m/specs>

Dos Santos, L. M., Ferraz, G. A. e. S., Barbosa, B. D. S., & Andrade, A. D. (2020). Use of remotely piloted aircraft in precision agriculture: a review. *Dyna*, 86(210), 284–291. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.74701>

Edwin, P. V. (2019). *Drones a tool for efficient agriculture: A high-tech future*. 37(1), 75–84.

Eng, L. S., Ismail, R., Hashim, W., & Baharum, A. (2019). The use of VARI, GLI, and VIgreen formulas in detecting vegetation in aerial images. *International Journal of Technology*, 10(7), 1385. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i7.3275>

Eng L, S., Ismail, R., Hashim, W., Mohamed, R. R., & Baharum, A. (2018). Vegetation monitoring using UAV : A preliminary study. *International journal of engineering & technology*, 7(4.35), 223. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.35.22736>

Eshov, M., Vafoev, B., & Homidov, H. (2022). A modern approach to the digitization of agricultural activities. *2021 ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON APPLIED MATHEMATICS AND STATISTICS*.

Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A., & Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. *FASEB Journal: Official Publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, 22(2), 338–342. <https://doi.org/10.1096/fj.07-9492LSF>

Fang, P., Yan, N., Wei, P., Zhao, Y., & Zhang, X. (2021). Aboveground biomass mapping of crops supported by improved CASA model and sentinel-2 multispectral imagery. *Remote Sensing*, 13(14), 2755. <https://doi.org/10.3390/rs13142755>

Fu, Y., Yang, G., Wang, J., & Feng, H. (2013). A comparative analysis of spectral vegetation indices to estimate crop leaf area index. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 19(3), 315–326. <https://doi.org/10.1080/10798587.2013.824176>

García, A. G. (2023, junio 13). *Usos y aplicabilidad de NVIVO en investigación social y de mercados*. Fundación iS+D; Fundación iS+D para la Investigación Social Avanzada. <https://isdfundacion.org/2023/06/13/usos-y-aplicabilidad-de-NVIVO-en-investigacion-social-y-de-mercados/>

García-Perdomo, H. A. (2015). Conceptos fundamentales de las revisiones sistemáticas/metaanálisis. *Revista Urología Colombiana / Colombian Urology Journal*, 24(1), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.uroco.2015.03.005>

Garzón, G. (2008). LAS ANTOCIANINAS COMO COLORANTES NATURALES Y COMPUESTOS BIOACTIVOS: REVISIÓN. *Acta biológica colombiana*, 13(3), 27–36. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2008000300002&lng=en&tlng=es.

Geipel, J., Link, J., Wirwahn, J., & Claupein, W. (2016). A programmable aerial multispectral camera system for in-season crop biomass and nitrogen content estimation. *Agriculture*, 6(1), 4. <https://doi.org/10.3390/agriculture6010004>

Gil-Docampo, M. L., Arza-García, M., Ortiz-Sanz, J., Martínez-Rodríguez, S., Marcos-Robles, J. L., & Sánchez-Sastre, L. F. (2020). Above-ground biomass estimation of arable crops using UAV-based SfM photogrammetry. *Geocarto International*, 35(7), 687–699. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1552322>

Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 416–426. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00018-4)

Hamm, A., & Lin, Z. (2019). “why drones for ordinary people?” digital representations, topic clusters, and techno-nationalization of drones on Zhihu. *Information (Basel)*, 10(8), 256. <https://doi.org/10.3390/info10080256>

Härdle, W. K., Müller, M., Sperlich, S., & Werwatz, A. (2012). *Nonparametric and Semiparametric Models*. Springer Series in Statistics.

Hashim, W., Eng, L. S., Alkawsy, G., Ismail, R., Alkahtani, A. A., Dzulkifly, S., Baashar, Y., & Hussain, A. (2021). A hybrid vegetation detection framework: Integrating vegetation indices and convolutional neural network. *Symmetry*, 13(11), 2190. <https://doi.org/10.3390/sym13112190>

Hernández-Soto, R., Gutiérrez-Ortega, M., & Rubia-Avi, B. (2021). Revisión sistemática exploratoria sobre el intercambio de conocimiento en las comunidades de práctica virtuales. En *New Trends in Qualitative Research* (pp. 239–248). Ludomedia.

Hijano, E. H., & Navarro, A. (1995). Enfermedades de la alfalfa. *Subprograma Alfalfa*.

Houborg, R., McCabe, M. F., Angel, Y., & Middleton, E. M. (2016). Detection of chlorophyll and leaf area index dynamics from sub-weekly hyperspectral imagery. En C. M. U. Neale & A. Maltese (Eds.), *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII*. SPIE.

Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>

Instruments, P. (2024, julio 19). *DUALEX - Avances en el control fitosanitario y nutricional - METOS® by Pessl Instruments*. METOS® por Pessl Instruments. <https://metos.global/es/dualex-advancing-plant-health-and-nutrition-monitoring/>

Jabri, C. et al. (2021). Discovering new genes for alfalfa (*Medicago sativa*) growth and biomass resilience in combined salinity and *Phoma medicaginis* infection stress. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1348168.

Jareña, N. (2023, enero 20). *Particularidades del cultivo de la alfalfa*. Corteva.es. <https://www.corteva.es/blog/Particularidades-del-cultivo-de-la-alfalfa.html>

Kneer, C., Burkart, A., Bongartz, J., Siegmann, B., Bendig, J., Jenal, A., & Rascher, U. (2023). A snapshot imaging system for the measurement of solar-induced chlorophyll fluorescence—addressing the challenges of high-performance spectral imaging. *IEEE sensors journal*, 23(19), 23255–23269. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3297054>

Krizova, K., & Kumhalova, J. (2017). *Comparison of selected vegetation indices and determination of suitability for yield description on agricultural field*.

Leskow, E. C. (2024). *Espectro Visible - Qué es, longitud de onda y colores*. <https://concepto.de/espectro-visible/>

Li, D., Chen, J. M., Yu, W., Zheng, H., Yao, X., Zhu, Y., Cao, W., & Cheng, T. (2024). A chlorophyll-constrained semi-empirical model for estimating leaf area index using a red-edge vegetation index. *Computers and Electronics in Agriculture*, 229(109722), 109722. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109722>

Li, S., Jiao, J., Chen, J., & Wang, C. (2022). A new polarization-based vegetation index to improve the accuracy of vegetation health detection by eliminating specular reflection of vegetation. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing: a publication of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 60, 1–18. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2022.3211503>

Manterola, C., Astudillo, P., Arias, E., & Claros, N. (2013). Revisiones sistemáticas de la literatura. Qué se debe saber acerca de ellas. *Cirugía española*, 91(3), 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.ciresp.2011.07.009>

Martín, D. (2021, octubre 5). Cultivo de la alfalfa, todo lo que necesita saber. *Esseeds*. <https://esseeds.com/blog/cultivo-de-la-alfalfa-guia-completa/>

Martínez-Flórez, S., González-Gallego, J., Culebras, J. M., & Tuñón, M. ^a. J. (2002). Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes. *Nutrición Hospitalaria*, 17, 271–278.

Meivel, S., & Maheswari, S. (2020). Optimization of agricultural smart system using remote sensible NDVI and NIR thermal image analysis techniques. *2020 International Conference for Emerging Technology (INCET)*.

Meivel, S., & Maheswari, S. (2021). Remote sensing analysis of agricultural drone. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(3), 689–701. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01244-y>

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2023). *Anuario de Estadística*. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2023/default.aspx?parte=3&capitulo=07&grupo=5&seccion=9>

Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, 106(1), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>

Moreno, B., Muñoz, M., Cuellar, J., Domancic, S., & Villanueva, J. (2018). Revisiones Sistemáticas: definición y nociones básicas. *Revista clínica de periodoncia, implantología y rehabilitación oral*, 11(3), 184–186.

Murugan, D., Garg, A., & Singh, D. (2017). Development of an adaptive approach for precision agriculture monitoring with drone and satellite data. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 10(12), 5322–5328. <https://doi.org/10.1109/jstars.2017.2746185>

Patil, S. M., Choudhary, S., Kholová, J., Anbazhagan, K., Parnandi, Y., Gattu, P., Mallayee, S., Ksvv, P., Kumar, V. P., Rajalakshmi, P., Chandramouli, M., & Adinarayana, J. (2023). UAV-based digital field phenotyping for crop nitrogen estimation using RGB imagery. *2023 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET)*, 1–6.

Pix4D: ¿Qué es y para qué sirve? (2022, agosto 28). *UAVLatam - Soluciones Empresariales con Drones*. <https://uavlatam.com/pix4d-que-es-para-que-sirve-ejemplos/>

Priyanka, Srivastava, P. K., & Rawat, R. (2023). Retrieval of leaf chlorophyll content using drone imagery and fusion with Sentinel-2 data. *Smart Agricultural Technology*, 6(100353), 100353. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100353>

Qian, B., Ye, H., Huang, W., Xie, Q., Pan, Y., Xing, N., Ren, Y., Guo, A., Jiao, Q., & Lan, Y. (2022). A sentinel-2-based triangular vegetation index for chlorophyll content estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 322, 109000. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109000>

Raj, R., Kar, S., Nandan, R., & Jagarlapudi, A. (2020). Precision agriculture and unmanned aerial vehicles (UAVs). En *Unmanned Aerial Vehicle: Applications in Agriculture and Environment* (pp. 7–23). Springer International Publishing.

Ralda, I. (2016). *Alfalfa deshidratada y henificada para el ganado*. <https://www.iralda.com/productos/alfalfa/>

Rama Rao, N., Garg, P. K., Ghosh, S. K., & Dadhwal, V. K. (2008). Estimation of leaf total chlorophyll and nitrogen concentrations using hyperspectral satellite imagery. *The Journal of Agricultural Science*, 146(01), 65–75. <https://doi.org/10.1017/s0021859607007514>

Ramirez, G., Montes de Oca, A., & Flores, G. (2023). 3D maps of vegetation indices generated onboard a precision agriculture UAV. *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 564–571.

Rivacoba, L., Vázquez, N., Suso, M. L., & Pardo, A. (2014). *Estimación del contenido de nitrógeno en hojas de coliflor por métodos de transmitancia y reflectancia*. Interempresas. <https://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/118519-Estimacion-del-contenido-nitrogeno-hojas-coliflor-metodos-transmitancia-reflectancia.html>

Rodríguez, N. E., Eroles, S. F., Basigalup, D. H., & Köpp, M. M. (2022). ORIGEN, DIFUSIÓN, MORFOLOGÍA Y FENOLOGÍA. En *Alfalfa: del cultivo a sus múltiples usos*.

Sánchez, A. (2023, julio 17). *¿Cuál es el mejor Dron con cámara 4K de 2024?* UMILES. <https://umilesgroup.com/mejor-drone-con-camara-4k/>

Sasagawa, T., Akitsu, T. K., Ide, R., Takagi, K., Takanashi, S., Nakaji, T., & Nasahara, K. N. (2022). Accuracy assessment of photochemical reflectance index (PRI) and chlorophyll carotenoid index (CCI) derived from GCOM-C/SGLI with in situ data. *Remote Sensing*, 14(21), 5352. <https://doi.org/10.3390/rs14215352>

Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763-1768.

Sela, I. G. (2019, marzo 22). *El nitrógeno en las plantas*. Cropaia. <https://cropaia.com/es/blog/nitrogeno-en-las-plantas/>

Spada, M. del C., Guzmán, C., & Tablada, M. (2007). Desarrollo fenológico de cultivares de alfalfa creciendo bajo niveles contrastantes de humedad del suelo en Córdoba, Argentina. *Sitio Argentino de Producción Animal*.

Sun, H., Hu, J., Wang, J., Zhou, J., Lv, L., & Nie, J. (2021). RSPD: A novel remote sensing index of plant biodiversity combining spectral variation hypothesis and productivity hypothesis. *Remote Sensing*, 13(15), 3007. <https://doi.org/10.3390/rs13153007>

Sun, Y., Ren, H., Zhang, T., Sui, J., Wang, Z., & Qin, Q. (2017). A novel LAI retrieval method based on the combination of 2 vegetation indexes. *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*.

Sun, Y., Ren, H., Zhang, T., Zhang, C., & Qin, Q. (2018). Crop leaf area index retrieval based on inverted difference vegetation index and NDVI. *IEEE geoscience and remote sensing letters: a publication of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 15(11), 1662–1666. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2018.2856765>

Sun, Y., Wang, B., & Zhang, Z. (2023). Improving leaf area index estimation with chlorophyll insensitive multispectral red-edge vegetation indices. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 16, 3568–3582. <https://doi.org/10.1109/jstars.2023.3262643>

Tomé, R. Z. (2022, julio 17). *¿Qué es la terapia de luz roja e infrarroja cercana?* Ramón Zelada. <https://ramonzelada.com/blog/terapia-de-luz-roja-e-infrarroja-cercana/>

Toscano, F., Fiorentino, C., Capece, N., Erra, U., Travascia, D., Scopa, A., Drosos, M., & D'Antonio, P. (2024). Unmanned aerial vehicle for precision agriculture: A review. *IEEE access: practical innovations, open solutions*, 12, 69188–69205. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3401018>

Universidad de Cundinamarca, Galeano Cañón, L. V., Rodríguez, M., Jiménez Pinzón, N. A., & Ortega Ortega, R. (2023). Drones in Agriculture 4.0. *Ingeniería solidaria*, 19(2), 1–27. <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2023.02.05>

Vincini, M., Frazzi, E., & D'Alessio, P. (2008). A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture*, 9(5), 303–319. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9075-z>

Wadod, M. M., & Mohammed, F. G. (2023). Review on Drone application methodologies in agriculture precision. *IOP conference series. Earth and environmental science*, 1202(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1202/1/012001>

White, C. M., Bradley, B., Finney, D. M., & Kaye, J. P. (2019). Predicting cover crop nitrogen content with a handheld normalized difference vegetation index meter. *Agricultural & Environmental Letters*, 4(1), 190031. <https://doi.org/10.2134/ael2019.08.0031>

Wu, W., Epstein, H. E., Guo, H., Li, X., & Gong, C. (2021). A pigment ratio index based on remotely sensed reflectance provides the potential for universal gross primary production estimation. *Environmental research letters*, 16(5), 054065. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf3dc>

Xie, Q., Dash, J., Huang, W., Peng, D., Qin, Q., Mortimer, H., Casa, R., Pignatti, S., Laneve, G., Pascucci, S., Dong, Y., & Ye, H. (2018). Vegetation indices combining the red and red-edge spectral information for leaf area index retrieval. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 11(5), 1482–1493. <https://doi.org/10.1109/jstars.2018.2813281>

Yin, G., Verger, A., Descals, A., Filella, I., & Peñuelas, J. (2022). A broadband green-red vegetation index for monitoring gross primary production phenology. *Journal of Remote Sensing*, 2022. <https://doi.org/10.34133/2022/9764982>

Zapata, M., Diaz, J. J., Monsalve, M. del P., & Garro, J. (2023, diciembre). CanSat Prototype for Plant Condition Characterization Through Vegetation Indices. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1–7.

Zar, J. H. (2014). *Biostatistical Analysis* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.

Zhang, H., Li, J., Liu, Q., Lin, S., Huete, A., Liu, L., Croft, H., Clevers, J. G. P. W., Zeng, Y., Wang, X., Gu, C., Zhang, Z., Zhao, J., Dong, Y., Mumtaz, F., & Yu, W. (2022). A novel red-edge spectral index for retrieving the leaf chlorophyll content. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(12), 2771–2787. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.13994>

Zhang, J., Trautman, D., Liu, Y., Bi, C., Chen, W., Ou, L., & Goebel, R. (2024). Achieving the rewards of Smart Agriculture. *Agronomy (Basel, Switzerland)*, 14(3), 452. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030452>

Zhang, Q. (2015). Control of precision agriculture production. En *Precision Agriculture Technology for Crop Farming* (pp. 103–132). CRC Press.

Zhong, C., Chen, Y., Tong, L., Huang, J., & Liang, J. (2017). A new method of leaf area index measurement based on the digital images. *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*.