

MASTER OFICIAL INTERUNIVERSITARIO

# REPRESENTACIÓN Y DISEÑO EN INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

## TRABAJO FIN DE MASTER

Determinación del índice de vegetación normalizado de un cultivo de girasol (*Helianthus annuus Lindl.*) a partir del análisis de imágenes obtenidas desde dispositivos aéreos no tripulados (UAVs)

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA



José Manuel López Plaza  
Curso 2011-2012

Directores:

Francisco Agüera Vega  
Fernando Carvajal Ramírez



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

MÁSTER OFICIAL INTERUNIVERSITARIO  
REPRESENTACIÓN Y DISEÑO EN  
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
-- ITINERARIO UAL --

## VISTO BUENO DEL DIRECTOR DE TRABAJO FIN DE MÁSTER

### DATOS DEL ESTUDIANTE

Apellidos y Nombre:	José Manuel López Plaza	DNI, NIE o Pasaporte:	74667040R
email:	Josem.lopez.plaza@juntadeandalucia.es	Teléfono:	606288401

### DIRECTOR/ES

DIRECTOR	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
Francisco Agüera Vega	Análisis de imágenes desde sensores remotos para el estudio de usos del suelo
Fernando Carvajal Ramírez	Análisis de imágenes desde sensores remotos para el estudio de usos del suelo

### TÍTULO

Determinación del índice de vegetación normalizado de un cultivo de girasol (*Helianthus annuus* Lindl.) a partir del análisis de imágenes obtenidas desde dispositivos aéreos no tripulados (UAV's)

El/los director/es del Trabajo Fin de Master cuyos datos se mencionan arriba da/n el visto bueno para su presentación en la convocatoria de

SEPTIEMBRE

Almería, 21 de septiembre de 2012

El/los director/es

El alumno/a

Fdo.: Francisco Agüera Vega

Fdo.: Fernando Carvajal Ramírez

Fdo.: José Manuel López Plaza

Ha sido depositado en la Secretaría de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Almería los siguientes documentos del Trabajo Fin de Master:

- 1 Ejemplar impreso
- 1 Ejemplar en formato digital en soporte CD o similar

Almería, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_

Por la Secretaría de la ESI

Fdo.: \_\_\_\_\_

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA



## Determinación del índice de vegetación normalizado de un cultivo de girasol (*Helianthus annuus* Lindl.) a partir del análisis de imágenes obtenidas desde dispositivos aéreos no tripulados (UAVs)



José Manuel López Plaza

---

## INDICE

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Palabras clave</b> .....	1
<b>Abstract</b> .....	2
<b>Key words</b> .....	2
<b>1 Introducción</b> .....	3
1.1 Revisión bibliográfica.....	5
1.2 Objetivos del trabajo.....	11
<b>2 Material y métodos</b> .....	11
2.1 Campo de experimentación.....	11
2.2 Mediciones ópticas.....	12
2.2.1 Toma de imágenes desde un dispositivo aéreo no tripulado.....	12
2.2.2 Plan de vuelo.....	13
2.2.3 Medidas radiométricas mediante dispositivo terrestre.....	16
2.3 Fecha de muestreo.....	17
2.4 Análisis de imágenes.....	17
2.4.1 Importación de las imágenes en falso color y segmentación en canales.....	18
2.4.2 Escalado y Georreferenciación.....	20
2.4.3 Clasificación de imágenes.....	21
2.4.4 Evaluación de la concordancia.....	23
2.4.5 Análisis de la imagen.....	24
<b>3 Resultados y discusión</b> .....	25
<b>4 Conclusiones</b> .....	27
<b>5 Referencias</b> .....	28
<b>6 Agradecimientos</b> .....	32

---

## APÉNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Valores de reflectancia de suelo y de cultivo (Fuente: Scotford et al., 2005, modificado).....	6
Figura 2	Localización de la parcela de ensayo.....	12
Figura 3	Representación en detalle del plan de vuelo ejecutado. La línea roja define itinerario de vuelo realizado, correspondiendo en éste a la pasada 1. Los puntos azules sobre la línea de itinerario corresponden a los puntos de captura de imagen (way point, WP).....	14
Figura 4	Representación en detalle del plan de vuelo ejecutado. La línea roja define itinerario de vuelo realizado, correspondiendo en éste caso a la pasada 2. Los puntos azules sobre la línea de itinerario corresponden a los puntos de captura de imagen (way point, WP).....	14
Figura 5	Representación en detalle del plan de vuelo ejecutado. La línea roja define itinerario de vuelo realizado, correspondiendo en éste caso a la pasada 3. Los puntos azules sobre la línea de itinerario corresponden a los puntos de captura de imagen (way point, WP).....	15
Figura 6	Representación en detalle del plan de vuelo ejecutado. La línea roja define itinerario de vuelo realizado, correspondiendo en éste caso con la pasada 4. Los puntos azules sobre la línea de itinerario corresponden a los puntos de captura de imagen (way point, WP).....	15
Figura 7	Distribución sobre el terreno, según número de vuelo y muestra, de cada uno de los puntos de control o dianas tras el procesado de la medición GPS.....	16
Figura 8	Detalle del interface desarrollado con el lenguaje de programación <i>VisualBasic 6.0</i> .....	17
Figura 9	Etapas del procesamiento digital de imágenes.....	
Figura 10	Ejemplo de las imágenes obtenidas tras la segmentación en los canales verde (imagen izquierda), rojo (imagen central) e infrarrojo (imagen derecha). Corresponde en éste caso a la pasada y way point 1 (imagen 1-1).....	19
Figura 11	Detalle del cuadro de diálogo para georreferenciar las imágenes de análisis ('RESAMPLE') que ofrece el software <i>Idrisi</i> .....	20
Figura 12	Ejemplo de digitalización y definición de los sitios de entrenamiento correspondiente a la pasada y way point 1 (imagen 1-1). Las códigos 1, 2 y 3 corresponden a las clases cultivo (rojo), sombras (blanco) y suelo (verde) respectivamente.....	21
Figura 13	Detalle del cuadro de diálogo 'MLP' o de clasificación de la imagen por el método de redes neuronales que ofrece el software <i>Idrisi</i> .....	22

Figura 14	Resultado de imagen binarizada (izquierda), e imagen que representa los valores del NDVI (derecha) para la pasada 2, <i>way point</i> 4 (imagen 4-2).....	24
Figura 15	Ejemplo en detalle de los valores de NDVI, en escala de color, contenidos en los archivos imagen obtenidos tras el procesado de la muestra. De izquierda a derecha, y de arriba abajo, corresponden a la muestras 1-1, 2-1, 3-1 4-4, 1-3, 1-2, 4-2 y muestra 4-1.....	25
Figura 16	Relación entre los valores de NDVI calculado a partir del análisis de imágenes y los calculados a partir del radioespectrómetro. Coeficiente de correlación $R= 7.163$ .....	27

### APÉNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Ejemplos de índices de vegetación utilizados en trabajos previos (Fuente: Scotford et al., 2005, modificado).....	8
Tabla 2	Plan de muestreo y nomenclatura empleada para la identificación de cada imagen.....	13
Tabla 3	Interpretación de los valores del índice Kappa de evaluación de concordancia (Landis y Koch, 1977).....	23
Tabla 4	Valores de NDVI obtenidos para cada una de las imágenes y calculados a partir del análisis de imagen y a partir de las lecturas del radioespectrómetro.....	26

### APÉNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1	Cámara ADC Lite Tetracam empleada en los ensayos de éste trabajo.....	12
Imagen 2	Md4-200 de Microdrones, vehículo aéreo no tripulado empleado para la captura de imágenes. En la parte inferior de la carcasa central se observa la cámara empleada para la toma de imágenes.....	13
Imagen 3	Detalle de la colocación de las ' <i>dianas</i> ' o puntos de control sobre el cultivo.....	16
Imagen 4	Ejemplo de imagen obtenida en falso color tras ser rasterizada. Corresponde en éste caso a la pasada y <i>way point</i> 1 (imagen 1-1).....	19



**Determinación del índice de vegetación normalizado de un cultivo de girasol (*Helianthus annuus* Lindl.) a partir del análisis de imágenes obtenidas desde dispositivos aéreos no tripulados (UAVs)**



## RESUMEN

La agricultura de precisión es un sistema de producción que lleva implícito el control de múltiples variables relacionadas con el manejo de los cultivos de una manera más localizada. A diferencia del manejo tradicional, establece metodologías que permiten un profundo análisis de las características del suelo, la morfología del terreno y el crecimiento del cultivo. La información obtenida permite establecer estrategias de manejo de cultivo más apropiadas.

Los sensores remotos son un componente básico de la agricultura de precisión y en particular, las técnicas de captación de imágenes desde sensores remotos aéreos cobran especial relevancia.

La utilización de sensores remotos en plataformas espaciales han sido el método más frecuente para obtener imágenes del territorio a evaluar, sin embargo son costosos, están muy condicionados por la meteorología y tienen poca disponibilidad, de ahí que su uso en explotaciones comerciales sea muy escaso.

En los últimos años, la reducción en el coste de los sistemas de posicionamiento global y el desarrollo de pequeños sensores de inercia ha motivado la creación por parte de compañías a desarrollar vehículos aéreos no tripulados (UAVs) los cuales nos permiten obtener imágenes de manera más localizada, con un alto grado de resolución y con mayor control del momento en que se desea obtenerlas.

Éste trabajo ha comparado el valor del índice de vegetación normalizado (NDVI), deducido desde imágenes obtenidas desde sensores instalados en dispositivos aéreos no tripulados con los obtenidos mediante un dispositivo terrestre, consistente en un radiómetro, sobre un cultivo de girasol. Los resultados han mostrado una significativa correlación entre ambos sistemas de medida. El trabajo pone de manifiesto, por un lado, que las imágenes tomadas con un sensor que capte las radiaciones roja e infrarroja cercana son útiles para determinar el NDVI del cultivo, y por otro, que el sistema ofrece mayor versatilidad con respecto al uso de imágenes de satélite.

## PALABRAS CLAVE

Agricultura de precisión, sensores remotos, vehículos aéreos no tripulados (UAVs), NDVI.



## ABSTRACT

Precision agriculture is a production system that implies the control of multiple variables related to crop management in a precision way. Precision agriculture establish methodologies that allow a thorough analysis of the soil characteristics, the morphology of the terrain and crop growth. The information obtained allows more appropriate management strategies for crop. Remote sensing is a key component of precision agriculture and in particular, the imaging techniques from aerial remote sensors are specially relevant.

Remote sensing in space platforms have been the most common method for imaging the territory, however, images from space platforms are costly, greatly influenced by the weather and have limited availability, hence its use in commercial farms is very low.

Currently, reduction in the cost of the global positioning system and the development of small inertial sensors has motivated companies to develop unmanned aerial vehicles (UAVs) which allow us to obtain images more localized manner, with a high degree of resolution and greater control to capture pictures.

This work has compared the value of the normalized difference vegetation index (NDVI), derived from images obtained from sensors on unmanned aerial devices with optical data collected with a ground-based platform.

The results have shown a significant correlation between the two measurement systems. The study shows that the images taken with a sensor that captures the red and near-infrared radiation are useful in determining the NDVI of the crop, in addition, it is a more versatile system with respect to the use of satellite imagery.

## KEY WORDS

Precision agriculture, remote sensing, unmanned aerial vehicles (UAVs), NDVI.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de cualquier agricultor es obtener una cosecha de la manera más efectiva posible. La agricultura de precisión es un sistema de producción que lleva implícito el control de múltiples variables relacionadas con el manejo de los cultivos de una manera más localizada. El sistema está basado en las nuevas herramientas y fuentes de información que proporcionan las tecnologías recientes. Los sistemas de posicionamiento global, los sistemas de información geográfica, el empleo de sensores remotos y el empleo de computadoras son elementos de ésta (Goddard et al., 1995). Esto nos permite mejorar la eficiencia debido a la posibilidad de alcanzar un mayor grado de conocimiento del desarrollo del cultivo.

La agricultura de precisión, a diferencia del manejo tradicional, establece metodologías que permiten un profundo análisis de las características del suelo, la morfología del terreno y el crecimiento del cultivo. La información obtenida permite establecer estrategias de manejo de cultivo más apropiadas. Los indicadores más importantes a tener en cuenta en relación con el crecimiento y desarrollo del cultivo son su contenido en nutrientes, la incidencia de malas hierbas, la incidencia de plagas y enfermedades y el manejo del agua (Agüera et al., 2011).

Los sensores remotos son un componente básico de la agricultura de precisión, y en particular, las técnicas de captación de imágenes desde sensores remotos aéreos cobran especial relevancia, sin embargo, el tiempo y los recursos para la captación de imágenes es limitado. De ahí que recientemente exista un creciente interés por desarrollar metodologías para obtener imágenes en determinados estados de crecimiento de un cultivo y que permitan un análisis del estado del cultivo certero y en un breve espacio de tiempo.

El empleo de sensores remotos para evaluar las condiciones de cultivo está basado en la relación existente entre la reflectancia del material vegetal, la temperatura de la cubierta vegetal, fotosíntesis y evapotranspiración. Bauer (1985) fue pionero en relacionar datos espectrales con datos meteorológicos, suelo y otros parámetros de cultivo. Jackson (1984) sugirió cuatro principales necesidades de los sistemas basados en sensores remotos en el manejo de los cultivos: cobertura frecuente, rápido procesado de los datos, alta resolución y precisión (de 5 a 2 m), y la integración de éstos datos con los meteorológicos y agronómicos. Hatfield y Pinter (1993) emplearon sensores remotos para describir situaciones de estrés en los cultivos motivado por la presencia de

malas hierbas, enfermedades, plagas, contenido limitado de agua y temperatura del suelo.

A pesar de que el empleo de sensores remotos en agricultura ha demostrado que posee un gran potencial, su adopción por parte de los agricultores aún es muy escasa; mientras GPS y GIS son utilizados con frecuencia, los sistemas remotos raramente son utilizados a nivel comercial y es que la agricultura de precisión es un concepto aún reciente, requiere información de las condiciones de cultivo a lo largo de los diferentes estados de desarrollo con cierta frecuencia, disponibilidad y precisión.

La utilización de sensores remotos en plataformas espaciales han sido el método más frecuente para obtener imágenes del territorio a evaluar (Santhosh K. et al., 2003), sin embargo son costosos, están muy condicionados por la meteorología y tienen poca disponibilidad, de ahí que su uso en explotaciones comerciales sea muy escaso, además los agricultores aún no están familiarizados con el empleo de sensores remotos y su potencial, no obstante aún deben limarse aspectos relacionados con los métodos para la obtención de imágenes.

El análisis de imágenes aéreas está principalmente enfocado en la generación de mapas mediante el uso de imágenes que contienen información acerca de los parámetros fisiológicos de los cultivos. Dos de los usos más frecuentes son la detección de malas hierbas y de estrés hídrico. No obstante existen referentes de interés en la evaluación del estado nutricional del cultivo. Algunos trabajos realizados con imágenes de alta resolución obtenidas desde la plataforma espacial IKONOS han mostrado buenos resultados en cuanto a la evaluación del contenido de nitrógeno en áreas de cultivo pequeñas (Reyniers et al., 2006).

Actualmente existen tres vías para obtener imágenes aéreas: desde satélites, aeroplanos y vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles*).

El uso de imágenes obtenidas desde satélites es muy costoso y de poca disponibilidad, debido fundamentalmente a la existencia de pocos satélites y de las condiciones climatológicas en la zona de muestreo, que pueden condicionar fuertemente la información contenida en la imagen. De otra parte, los vuelos comerciales han sido hasta ahora la vía de obtención de imágenes aéreas en detrimento del empleo de satélites, sin embargo, no mejoran las prestaciones con respecto al empleo de satélites: continúan siendo costosas, de poca disponibilidad (pocas compañías ofrecen éste servicio) y existe una alta dependencia de las condiciones meteorológicas (Barrientos et al., 2011).

En los últimos años, la reducción en el coste de los sistemas de posicionamiento global y el desarrollo de pequeños sensores de inercia ha motivado la creación por parte de compañías a desarrollar vehículos aéreos no tripulados, los cuales nos permiten obtener imágenes de manera más localizada, con un alto grado de resolución (tamaño de pixel entre 0.05-2 m<sup>2</sup>) y con mayor control del momento en que se desea obtenerlas (Scotford y Miller, 2005), y a pesar de algunos aspectos negativos como la autonomía de vuelo o la alta influencia de episodios atmosféricos, principalmente el viento, en conjunto se trata de una herramienta de gran potencial tanto desde el punto de vista económico como funcional.

Por tanto, en línea de lo expuesto, la obtención de imágenes por medio de sensores remotos instalados en vehículos aéreos no tripulados, nos permite obtener imágenes con gran cantidad de información en áreas de cultivo pequeñas, de manera que el adecuado análisis de éstas, permite estimar determinados parámetros de control de cultivo, y por ende ofrece a los productores la posibilidad de establecer medidas correctoras de manera localizada y con mayor precisión.

### 1.1 Revisión bibliográfica

El espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja con una longitud de onda comprendida entre el espectro visible y el infrarrojo cercano (400-2500 nm) se asocia a determinadas características del suelo o estados de desarrollo de un cultivo u otras masas vegetales. Diferentes medidas del espectro electromagnético en estudios relacionados con la agricultura han conseguido discriminar diferentes coberturas del suelo o identificar diferentes masas vegetales y así establecen la posibilidad de determinar algunos parámetros de cultivo, como pueden ser las propiedades del suelo, detección de las malas hierbas y densidad de plantación, así como la cantidad de nitrógeno (Scotford et al., 2005), sin embargo, existen pocas referencias del empleo de estos conceptos y métodos en el manejo de de las plantaciones a nivel comercial.

En éste sentido, la mayoría de los estudios utilizan medidas el espectro visible (400-700 nm) y del infrarrojo cercano (700-2500 nm); las longitudes de onda comprendidas en ésta región pueden asociarse a diferentes estados biológicos y fisiológicos de un cultivo, así lo ponen de manifiesto varios estudios que han tomado como referencia ésta región del espectro electromagnético, sus reflexiones son una herramienta de trabajo de referencia en el manejo de parámetros de control de un cultivo (Scotford et al., 2005).

El principio sobre el que se fundamenta esta idea es que existe una fuerte relación entre la concentración de nitrógeno en la hoja y su contenido en clorofila (Han et al., 2001), concepto fundamental para predecir el contenido en nitrógeno de un cultivo mediante la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja (Filella et al., 1995). Un elevado valor de la reflectancia está fuertemente relacionado con valores decrecientes en el contenido en clorofila, consecuencia de un bajo contenido en nitrógeno. Incrementos en la reflexión espectral adquirida en el infrarrojo cercano (NIR) responden a incrementos en el índice de área foliar e incremento de biomasa, relación ampliamente demostrada en cultivos de trigo (Peñuelas et al., 1996).

Miller et al. (2000), demostraron en sus ensayos las amplias diferencias existentes entre la longitud de onda que la vegetación emite o refleja con respecto a la del suelo, especialmente el espectro en la banda del rojo, donde el porcentaje de reflectancia del cultivo es muy superior a la del suelo (figura 1).

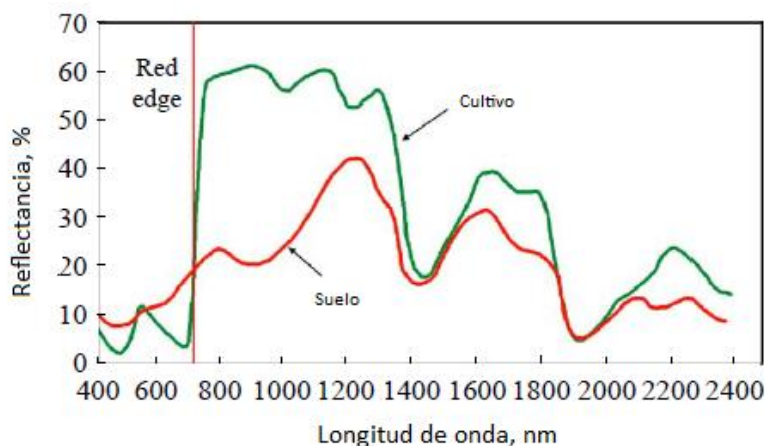


Figura 1. Valores de reflectancia de suelo y de cultivo (Fuente: Scotford et al., 2005, modificado).

El principio es que la mayoría de la banda electromagnética del rojo, es absorbida por la cubierta vegetal, por tanto, sólo una pequeña proporción del espectro es reflejada, sin embargo, una alta proporción de la banda del infrarrojo cercano es reflejada. A medida que la cubierta vegetal aumenta, bien por el aumento de la biomasa, o bien por el aumento en el contenido de clorofila, el porcentaje de reflectancia de la banda del rojo decrece, mientras que aumenta la del infrarrojo cercano.

Una cubierta vegetal tipo, posee una de reflectancia entre los 480 y 680 nm, región del espectro electromagnético donde existe una fuerte absorción de clorofila y otros pigmentos, pero es en la región del NIR donde existe un mayor valor, debido a las estructuras microcelulares que componen la hoja y estructuras de la cubierta (Thomas y Oerther, 1972).

Feng et. al (2007) determinaron que los valores de reflectancia de la cubierta vegetal de un cultivo bajo diferentes etapas de crecimiento eran marcadamente diferentes bajo diferentes valores de nitrógeno, con un patrón sistemático evidente entre diferentes cultivares de trigo. En la banda del ultravioleta visible, la reflectancia era menor a mayor cantidad de nitrógeno, mientras que en la banda del NIR (740-1100 nm) el valor de la reflectancia tiende a incrementar a mayores valores de niveles de nitrógeno, mostrando las mayores diferencias entre los niveles de nitrógeno en la región de NIR de longitudes de onda corta que en la región del visible. Esto indica que la reflectancia en el NIR era responsable del estatus de crecimiento en el trigo bajo diferentes niveles de nitrógeno. De otra parte, se ha de considerar que diferentes tipos de suelo y de cultivos, han mostrado diferentes características en los valores del espectro electromagnético (Barnes y Baker, 2000; Shibusawa et al.,2001).

El fundamento físico sobre el que se asienta éste comportamiento es que la energía  $E$  de las ondas electromagnéticas está relacionada con su longitud de onda  $\lambda$ .

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde  $h$  es la constante de Plank ( $6.6 \times 10^{-34}$  Js) y  $c$  es la velocidad de la luz. Debido a que  $h$  y  $c$  son valores constantes, las ondas electromagnéticas de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta y mucha energía mientras que las ondas de baja frecuencia tienen grandes longitudes de onda y poca energía. Parte de ésta energía es absorbida, reflejada o transmitida en un grado que dependerá de las propiedades físicas y químicas del cuerpo o superficie sobre el que impacta.

Las plantas absorben radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa, la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis. Las células vegetales han evolucionado para dispersar la radiación solar en la región espectral del infrarrojo cercano, la cual lleva aproximadamente la mitad del total de la energía solar, debido a que el nivel de energía por fotón en ese dominio (de longitud de onda mayor a los 700 nm) no es suficiente para sintetizar las moléculas orgánicas: una fuerte absorción en

este punto sólo causaría en un sobrecalentamiento de la planta que dañaría los tejidos. Por lo tanto, la vegetación aparece relativamente oscura en la región de radiación fotosintética activa y relativamente brillante en el infrarrojo cercano.

Para la mayoría de los estudios de agronomía se utilizan índices de vegetación que determinan determinados factores fisiológicos del cultivo (Tabla1). En general se utilizan valores de reflectancia del rojo (R) y del rojo cercano (NIR) que caracterizan el valor del índice de vegetación normalizado, cuyo valor aumenta a medida que aumenta la cobertura vegetal.

Índice	Ecuación	Longitud de onda (nm)	Autor de referencia
<b>NDVI</b> (Normalised difference vegetation index)	$I_{NDV} = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$	NIR=730, red = 660	Stafford y Bolam (1998)
		NIR =830, red =660	Oberti y Baerdemaeker (2000)
		NIR = 840, red = 640	Wood et al. (2000)
		NIR =800, red = 600	Basso et al. (2001)
<b>RVI</b> (Red ratio vegetation index)	$I_{RV} = \frac{R_{NIR}}{R_{RED}}$	NIR = 850, red = 650	Biller (1998)
		NIR = 830, red =660	Oberti y Baerdemaeker (2000)
<b>GVI</b> (Green ratio vegetation Index)	$I_{GV} = \frac{R_{NIR}}{R_{GREEN}}$	NIR =830, green = 560	Oberti y Baerdemaeker (2000)
<b>SAVI</b> (Soil-adjusted vegetation Index)	$I_{SAV} = \frac{1.5(R_{NIR} - R_{RED})}{R_{NIR} + R_{RED} + 0.5}$	NIR = 760, red = 660	Bennedsen y Guiot (2001)

Tabla 1. Ejemplos de índices de vegetación utilizados en trabajos previos (Fuente: Scotford et al., 2005, modificado).

El nitrógeno es el nutriente más demandado durante el crecimiento de las plantas, afecta significativamente en la fotosíntesis de las plantas y al rendimiento de los cultivos, de éste modo, la fertilización con nitrógeno es una de las principales técnicas orientadas a la obtención de un mayor rendimiento de los cultivos (Woodard y Bly, 1998). La aplicación de fertilizantes nitrogenados en los campos de cultivo es de vital importancia porque puede condicionar el desarrollo de la planta, su vigor, color y crecimiento (Pearson, 1984).

La concentración y acumulación de nitrógeno en los tejidos de las plantas son dos de los mayores indicadores para caracterizar los niveles de concentración de nitrógeno que éstas poseen. La acumulación de nitrógeno en la planta es el producto del contenido en nitrógeno de la planta y su biomasa, y

afecta fuertemente en la cantidad y calidad de la producción vegetal (Zhang et al., 1996; Guo et al., 2005).

La correcta aplicación de las estrategias de fertilización, deben asegurar niveles adecuados de nitrógeno. Una efectiva diagnosis y una regulación dinámica de la concentración de nitrógeno en planta debe estar basado en el monitoreo en tiempo real de los parámetros de crecimiento y niveles de nitrógeno. Hasta ahora, el método tradicional para la medida de la cantidad de nitrógeno dependía de un muestreo sobre el tejido vegetal del campo de cultivo o ensayo en laboratorio (Roth y Fox, 1989).

Sin embargo, el nitrógeno es un elemento de difícil estimación y medida. El uso de determinados índices de suelo han sido típicamente utilizados para estimar los niveles de nitrógeno (MAFF, 2000). Éstos índices están basados en previos estados de desarrollo del cultivo y tipos de suelo. La cantidad total de nitrógeno requerido por un cultivo de cereal depende del tipo de cultivo, tipo de suelo, cantidad de nitrógeno del suelo y rendimiento esperado. Los valores estándar son utilizados con frecuencia para estimar la cantidad de nitrógeno que necesita el cultivo (MAFF, 2000). Estas recomendaciones están basadas en valores de rendimiento medio y combinación de tipos de suelo.

Varios métodos de mejora han sido propuestos para una estimación no destructiva de nitrógeno de un cultivo como tablas de color de la hoja o medidores de clorofila, no obstante, se trata de métodos que permiten una medición a nivel de hoja, son muy localizados y resulta complicado extrapolar los resultados a toda la población y por ende permitan una reflexión rápida sobre los niveles de concentración de nitrógeno en nuestro campo de cultivo.

Investigaciones llevadas a cabo por Sylvester-Bradley et al. (2000) sobre el manejo de la cubierta vegetal, sugirieron que los niveles de nitrógeno podrían ser más ajustados mediante inspecciones visuales del cultivo, más particularmente atendiendo a las densidades de plantación (plantas  $m^{-2}$ ) e índice de área foliar.

Godwin (2000), Wood et al (2000) y Taylor et al. (2000) utilizaron fotografía aérea digital de la banda del rojo del espectro fotogramétrico para calcular el valor del NDVI en un cultivo de cereal y demostraron la buena correlación entre el número de plantas o densidad de tallos. Sin embargo para obtener valores absolutos de plantas o número de tallos, se debe realizar una calibración de la superficie que conducía a una valoración con detalle de la superficie de cultivo. Basado en éstas medidas, las aportaciones de nitrógeno fueron diferentes de acuerdo con la densidad de tallos, con mayores niveles de nitrógeno aplicados en zonas de menor densidad de tallos, y con menores



niveles de nitrógeno, en áreas de mayor densidades de éstos (HGCA, 2002). El objetivo es manipular cubierta vegetal hasta alcanzar un valor adecuado de índice de área foliar. Éstos experimentos concluyeron este era un método útil para estimar la densidad de los cultivos y sirvió de base para establecer estrategias de aplicación de nitrógeno en base al manejo de la cubierta vegetal.

De otra parte, recientes estudios relacionados con la determinación del espectro electromagnético han proporcionado una metodología eficaz y no destructiva en la determinación de determinados parámetros fisiológicos y nutricionales de las plantas. El empleo de sensores remotos instalados en dispositivos terrestres son excepcional herramienta para el monitoreo y estimación de parámetros de crecimiento de un cultivo, así como la estimación del contenido de nitrógeno en los tejidos de las plantas, lo que permite realizar estrategias de fertilización más certeras y exactas en cuanto al ratio de nitrógeno a aportar con los consecuentes beneficios económicos y medioambientales (Alt et al., 2000).

De especial interés son aquellos relacionados con el empleo de sensores remotos sobre la cubierta vegetal, instalados tanto en plataformas espaciales como en vehículos aéreos no tripulados. Éstos estudios han mostrado buenos resultados en la evaluación del estado nutricional del cultivo, las metodologías propuestas tienen la capacidad per sé de muestrear un área de cultivo grande y representativa en poco tiempo y con un número bajo de repeticiones en la toma de muestras.

Considerando los argumentos descritos Feng et al. (2007), en sus trabajos vienen a concluir cómo la agricultura de precisión es capaz de establecer metodologías de estimación de aportación del nitrógeno de manera oportuna y racional, con un tiempo real de toma de muestras de los parámetros de cultivo así como de la situación del nitrógeno. La concentración de nitrógeno en hoja puede ser un buen indicador del estado nutricional de la planta, numerosos estudios han estimado la concentración de nitrógeno en hoja (LNC) a partir de los valores de longitud de onda que emite o refleja el material vegetal.

Han et al. (2005) por su parte, previamente establecieron diferentes estrategias de fertilización en un cultivo de trigo, y emplearon vehículos aéreos para captar imágenes. Tras el procesado de éstas, obtuvieron el valor diferentes índices de vegetación del cultivo bajo las diferentes estrategias de aportes de nitrógeno empleadas.

Los índices de vegetación calculados mostraron buena correlación con respecto a los niveles de fertilización y estado de desarrollo del cultivo. A raíz de sus ensayos pusieron de manifiesto como con el empleo de éste tipo de técnicas, asociadas a la agricultura de precisión, son capaces de poner de manifiesto la eficiencia de las prácticas de fertilización, con los consecuentes beneficios ambientales que lleva asociado.

En ésta misma línea, recientes trabajos han comparado el índice relacionado con el contenido de nitrógeno de un cultivo de girasol, deducido desde imágenes multiespectrales obtenidas desde dispositivos aéreos no tripulados y dispositivos terrestres. Agüera et al. 2011, ponen de manifiesto lo certero del cálculo del NDVI a partir de imágenes obtenidas desde UAV's y ponen en valor el empleo de sensores remotos instalados en UAV como herramienta precisa para obtener información sobre el desarrollo y estado de un cultivo frente a otros sistemas análogos a éste

## 1.2 Objetivos del trabajo

El principal objetivo de éste trabajo es comparar el valor del índice de vegetación normalizado (NDVI), deducido desde imágenes obtenidas desde sensores instalados en dispositivos aéreos no tripulados, con los obtenidos mediante un dispositivo terrestre consistente en un radiómetro, sobre un cultivo de girasol.

Se pretende poner en valor el empleo de sensores remotos instalados en UAVs como herramienta precisa para obtener información sobre el desarrollo y estado de un cultivo frente a otros sistemas análogos a éste, de tal forma que la toma de decisiones sobre el manejo del cultivo sean más certeras y se puedan llevar a cabo en el momento oportuno.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1 Campo de experimentación

La parcela de experimentación se encuentra en el Campus Agroalimentario, Científico y Técnico de Rabanales (37°55'50"N, 4°43'06"O), perteneciente a la Universidad de Córdoba (figura 2).

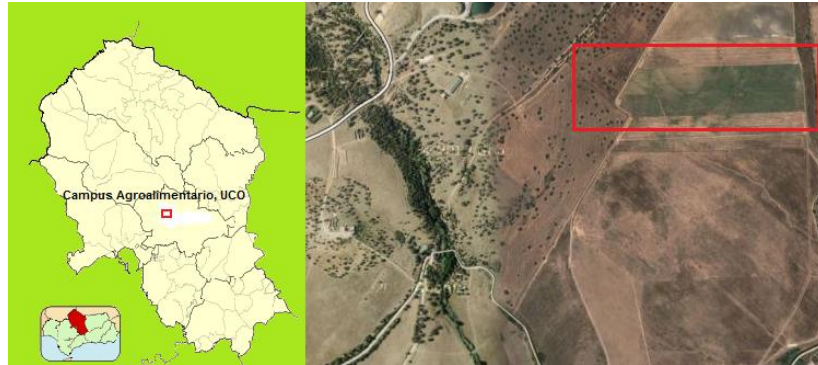


Figura 2. Localización de la parcela de ensayo.

La parcela se sembró con el híbrido comercial de girasol (*Helianthus annuus* Lindl.). La densidad de siembra fue de 7,1 plantas x m<sup>-2</sup>, densidad de plantación de referencia en la zona. La parcela pertenece a un proyecto en el que a lo largo de varias campañas se han venido comparando los sistemas de laboreo convencional y de no laboreo, por lo que se encuentra dividida en dos subparcelas, cada una de ellas bajo un sistema de laboreo diferente.

## 2.2 Mediciones ópticas

### 2.2.1 Toma de imágenes desde un dispositivo aéreo no tripulado

Para la toma de imágenes desde el dispositivo aéreo no tripulado se dispuso de una cámara digital 'ADC Lite Tetracam' (imagen 1) (<http://www.tetracam.com/>), que se montó sobre la aeronave no tripulada modelo 'md4-200 Microdrones' (imagen 2) (<http://www.microdrones.com>).

'ADC Lite Tetracam' es una cámara digital diseñada para captar el espectro visible con longitudes de onda superiores a 520 nm así como el infrarrojo cercano, de longitudes de onda hasta 920 nm. . Dispone de un solo sensor CMOS con una resolución de 3.2 Megapíxeles (2048x1536). Proporciona imágenes con tres bandas: rojo, verde e infrarrojo cercano (aproximadamente como las bandas TM2, TM3 y TM4 del Landsat).



Imagen 1. Cámara ADC Lite Tetracam empleada en los ensayos de éste trabajo.



Imagen 2. Md4-200 de Microdrones, vehículo aéreo no tripulado empleado para la captura de imágenes. En la parte inferior de la carcasa central se observa la cámara empleada para la toma de imágenes.

### 2.2.2 Plan de vuelo

Se han diseñado 4 itinerarios (pasadas) de vuelo sobre el cultivo, dos para la superficie en laboreo (figuras 3 y 4) y dos para la superficie cultivada en no laboreo, (figuras 5 y 6), en dirección oeste a este en todos los casos. Para ello se dispuso del software *mdcockpit.v.2.6*.

En cada pasada se programaron 5 puntos de captura de imágenes (way points). A tenor de lo expuesto, la muestra de análisis constó de 5 imágenes por cada pasada de vuelo (tabla 2).

		Puntos de muestreo proyectados				
		Wp 1	Wp 2	Wp 3	Wp 4	Wp 5
		<i>Identificación de la muestra</i>				
LABOREO	Pasada 1	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
	Pasada 2	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
NO LABOREO	Pasada 3	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
	Pasada 4	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5

Tabla 2. Plan de muestreo y nomenclatura empleada para la identificación de cada imagen.

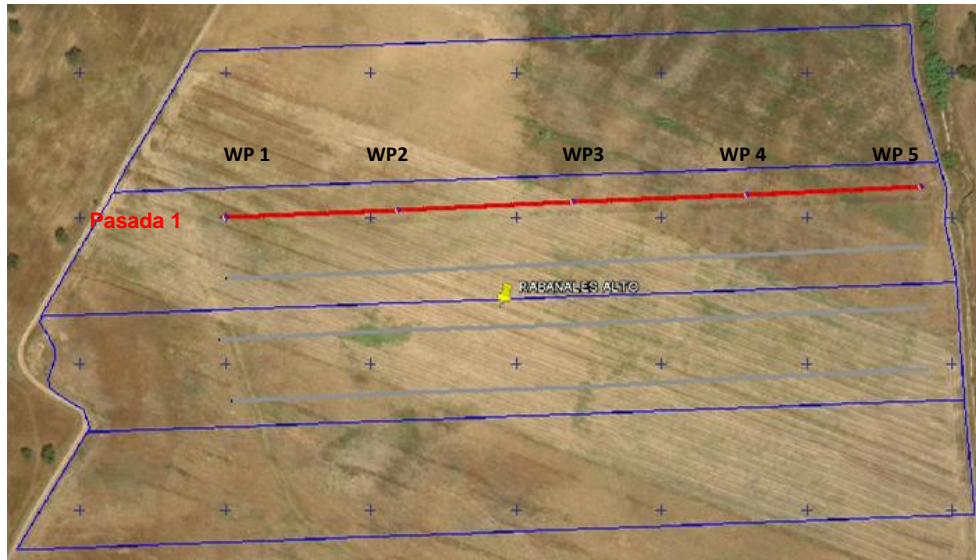


Figura 3. Representación en detalle del plan de vuelo ejecutado. La línea roja define itinerario de vuelo realizado, correspondiendo en éste a la pasada 1. Los puntos azules sobre la línea de itinerario corresponden a los puntos de captura de imagen (way point, WP).

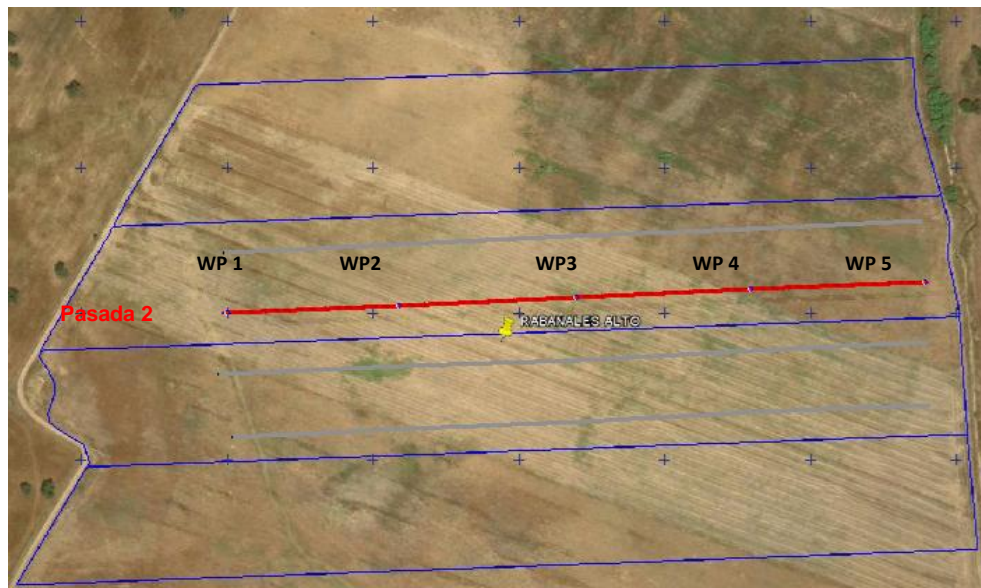


Figura 4. Representación en detalle del plan de vuelo ejecutado. La línea roja define itinerario de vuelo realizado, correspondiendo en éste caso a la pasada 2. Los puntos azules sobre la línea de itinerario corresponden a los puntos de captura de imagen (way point, WP).

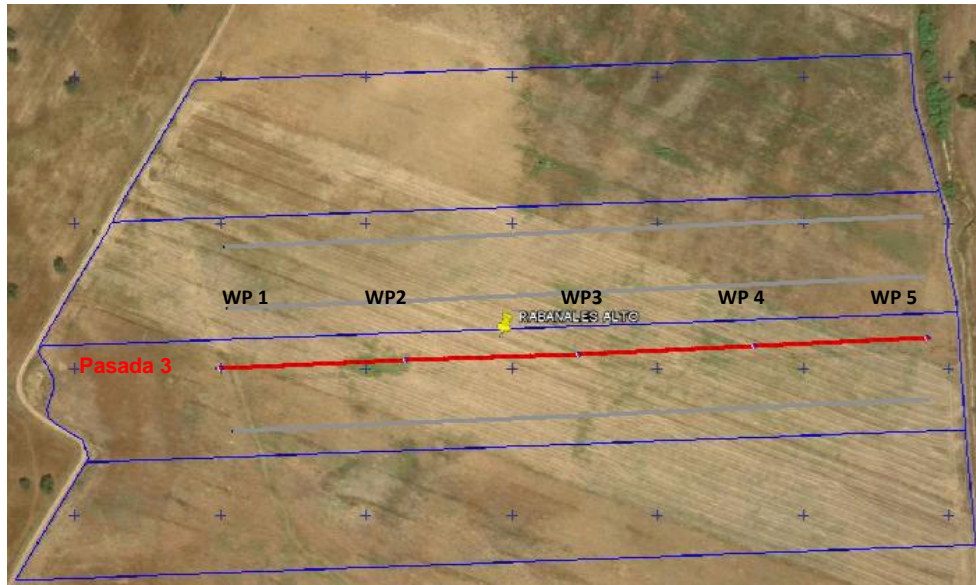


Figura 5. Representación en detalle del plan de vuelo ejecutado. La línea roja define itinerario de vuelo realizado, correspondiendo en éste caso a la pasada 3. Los puntos azules sobre la línea de itinerario corresponden a los puntos de captura de imagen (way point, WP).

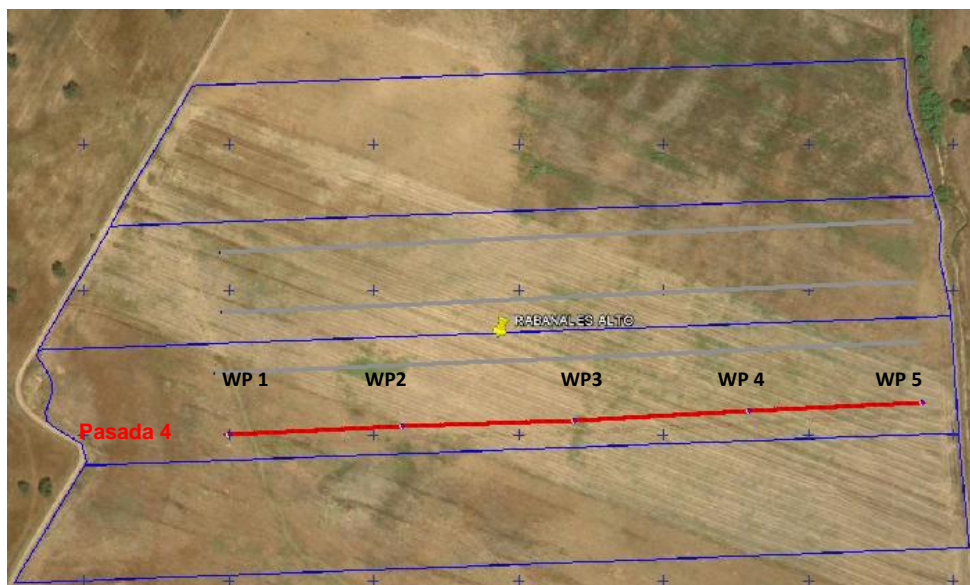


Figura 6. Representación en detalle del plan de vuelo ejecutado. La línea roja define itinerario de vuelo realizado, correspondiendo en éste caso a la pasada 4. Los puntos azules sobre la línea de itinerario corresponden a los puntos de captura de imagen (way point, WP).

Previo a la ejecución del vuelo y captura de imágenes, se distribuyeron una serie de paneles o dianas de referencia (puntos de control) en cada una de las líneas de vuelo propuestas (imagen 3). Su posición sobre el terreno se diseñó de manera que aparecieran cuatro puntos de control por cada imagen

de muestra seleccionadas (figura 7). Se determinaron las coordenadas de cada punto de control mediante un GPS de precisión centimétrica. Se dispuso para ello del modelo Trimble R6 GPS. Esta tarea permitió georreferenciar las imágenes tomadas.



Imagen 3. Detalle de la colocación de las ‘dianas’ o puntos de control sobre el cultivo.

	Wp 1	Wp 2	Wp 3	Wp 4	Wp 5
Pasada 1					
Pasada 2					
Pasada 3					
Pasada 4					

Figura 7. Distribución sobre el terreno, según número de vuelo y muestra, de cada uno de los puntos de control o dianas tras el procesado de la medición GPS.

### 2.2.3 Medidas radiométricas mediante dispositivo terrestre

Se dispone de un dispositivo de medida terrestre ‘Pacific Vision, Inc multiespectral Radiometer’. Los diferentes sensores tomaron medidas de la irradiación del cultivo a la vez que corrigen la incidencia del sol y del cielo. El rango de medida del radiómetro es para una longitud de onda entre 517 nm y 1182 nm, con una resolución de 16 bits.

Para las pasadas 1 y 3 se tomaron 10 medidas en la zona de la imagen asociada a cada way point, constituyendo por tanto un total de 100. Para las pasadas 2 y 4 el número de medidas en la zona de la imagen tomada desde cada way point fue de 20, constituyendo por tanto un total de 200.

El procesado de las medidas se realizó con un programa desarrollado con el lenguaje de programación *VisualBasic 6.0*, cuyo interface se muestra en la figura 8. Para calcular el índice de vegetación normalizado se tuvieron en cuenta las longitudes de onda del rojo (636 nm) y del infrarrojo cercano (744 nm).

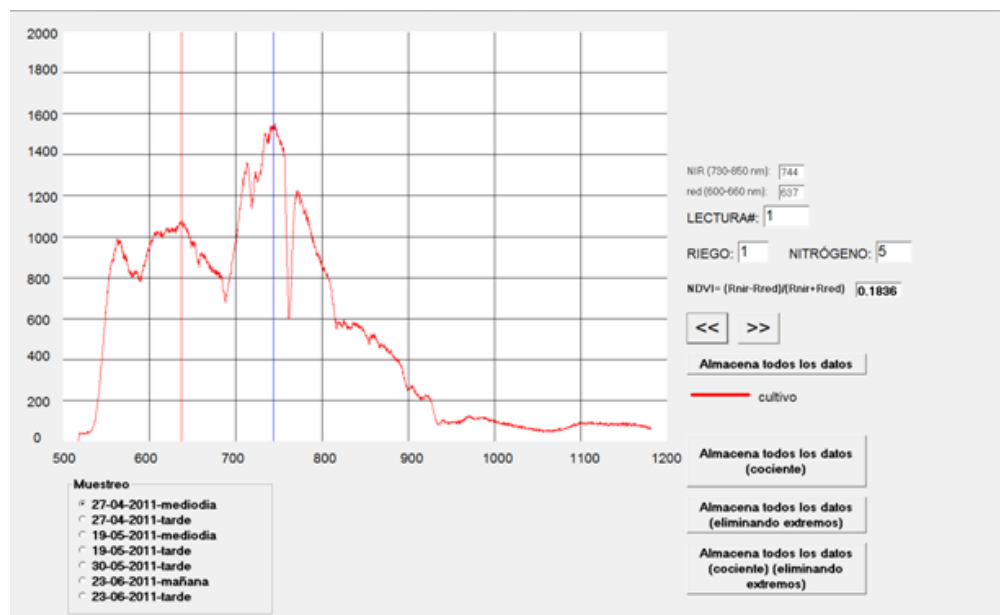


Figura 8. Detalle del interface desarrollado con el lenguaje de programación *VisualBasic 6.0*.

### 2.3 Fecha de muestreo

La toma de muestras tanto desde el dispositivo aéreo no tripulado, como desde el dispositivo terrestre, se ejecutó en la misma jornada.

El muestreo se realizó el 31 de mayo; el estado de desarrollo del cultivo puede asociarse a los estados fenológicos comprendidos entre R1 y R3 (Schneiterand y Miller, 1981), estados en los que ya se ha superado la iniciación floral, y en los que se inicia la diferenciación del receptáculo y supervivencia de las flores.

### 2.4 Análisis de imágenes

Las técnicas para analizar una imagen digital se agrupan en un área llamada '*Procesamiento Digital de Imágenes*'. Estas herramientas se organizan



según el nivel de procesamiento que se desea realizar para analizar la información contenida en una imagen digital.

Estos niveles forman una cadena que abarcan desde un primer paso de preprocesamiento, hasta el análisis de la imagen (figura 9).

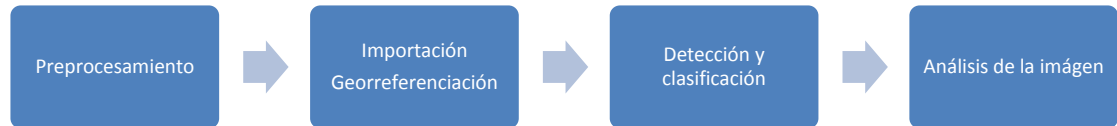


Figura 9. Etapas del procesamiento digital de imágenes.

Para el análisis de las imágenes se utilizó el software IDRISI *taiga* (<http://www.clarklabs.org/>).

El programa IDRISI es uno de los softwares de SIG tipo raster más utilizados en el mundo. El programa IDRISI maneja fundamentalmente datos de tipo RASTER (archivos '.rst'). No obstante, permite la gestión de datos tipo VECTOR (archivos '.vct') y de tablas de atributos temáticos. Un elemento básico del programa es que la estructura de sus archivos de datos es pública, por lo que es fácil elaborar programas que realicen nuevas funciones sobre dichos datos o incorporar rutinas de IDRISI a otras aplicaciones, utilizando diferentes lenguajes de programación (Delphi, Visual C++, Visual Basic, o Visual Basic for Applications (VBA)).

#### 2.4.1 Importación de las imágenes en falso color y segmentación en canales.

En éste primer paso, se llevaron a cabo las operaciones para hacer una partición de la imagen en varias regiones que representen la información necesaria para el problema a resolver.

Se partió de un total de 20 archivos *en formato 'jpeg'* asociado cada uno de ellos a las imágenes de la muestra obtenida. Se empleó el módulo de importación y transformación de archivos de formato *'jpg'* a archivos raster, consiguiendo así un set de datos asociado a las imágenes de muestra (imagen 4). Cada una de las imágenes fue segmentada en tres bandas, con nomenclatura *band1*, *band2* y *band3*, correspondientes a los canales verde, rojo e infrarrojo respectivamente (figura 10).

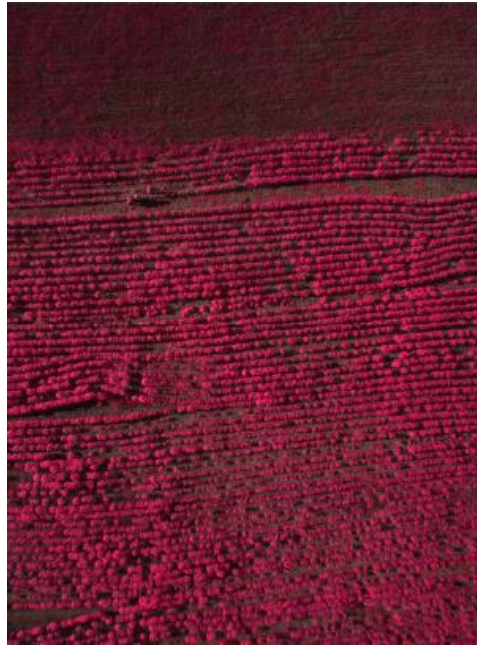


Imagen 4. Ejemplo de imagen obtenida en falso color tras ser rasterizada. Corresponde en éste caso a la pasada y *way point* 1 (imagen 1-1).

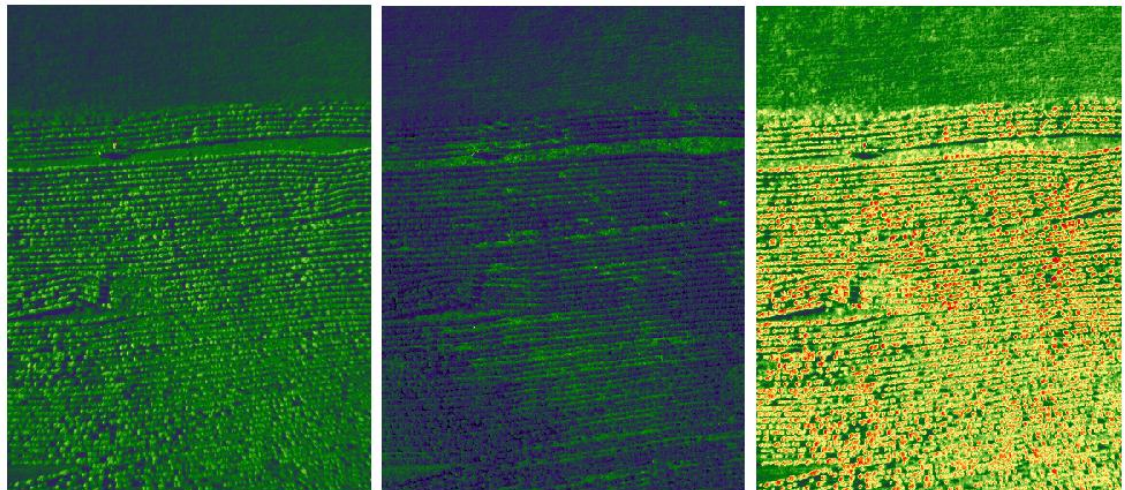


Figura 10. Ejemplo de las imágenes obtenidas tras la segmentación en los canales verde (imagen izquierda), rojo (imagen central) e infrarrojo (imagen derecha). Corresponde en éste caso a la pasada y *way point* 1 (imagen 1-1).

### 2.4.2 Escalado y Georreferenciación.

La Georreferenciación es el posicionamiento en el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen) en un sistema de coordenadas y datum determinado. Este proceso es utilizado frecuentemente en los Sistemas de Información Geográfica.

Posee una definición tecno-científica, aplicada a la existencia de las cosas en un espacio físico, mediante el establecimiento de relaciones entre las imágenes ráster o vector sobre una proyección geográfica o sistema de coordenadas. Por ello la Georreferenciación adquiere una gran importancia para los modelados de datos realizados por los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Para realizar ésta operación, el software nos ofrece el comando de trabajo *RESAMPLE* (figura 11).

El proceso de georreferenciación con el software empleado comienza con la declaración de la imagen sobre la que se va a actuar. Se marcan los puntos de control y a partir de sus coordenadas se procede al escalado y desplazamiento de la imagen para georreferenciarla. El método de georreferenciación usado fue mediante una transformación lineal.

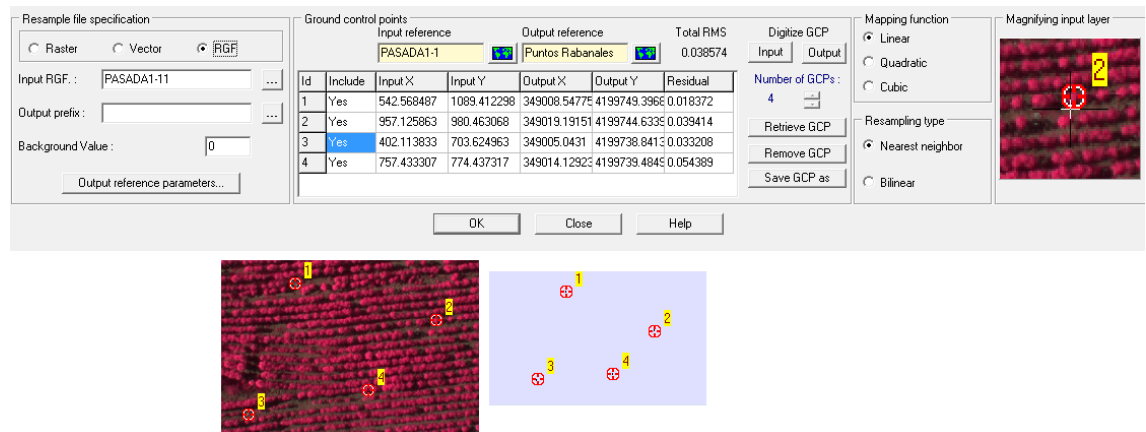


Figura 11. Detalle del cuadro de diálogo para georreferenciar las imágenes de análisis ('RESAMPLE') que ofrece el software *Idrisi*.

Esta operación se repitió para cada uno de los canales de cada imagen y una vez georreferenciados, se realizó la operación inversa a la segmentación de imágenes, obteniendo con ello un conjunto de imágenes georreferenciadas en falso color.

### 2.4.3 Clasificación de imágenes.

Con este paso se pretendió obtener una imagen en la que se discriminara la cobertura del terreno ocupada por el cultivo del resto. Si se consigue este objetivo, los índices de vegetación que se calculen no estarán contaminados con píxeles que no corresponden a cultivo. Para conseguir esta discriminación se utilizará un método de clasificación de imágenes denominada supervisada. Los métodos de clasificación supervisada se basan en la descripción de la firma espectral de las clases a discriminar en la imagen a través de las llamadas zonas de entrenamiento y mediante cálculos estadísticos se decide para cada píxel a qué clase pertenece.

Los pasos seguidos en este trabajo para la clasificación de las imágenes fueron los siguientes:

**a) Definimos los sitios de entrenamiento.** Es decir, definimos las áreas que serán usadas como sitios de entrenamiento para cada clase de cobertura terrestre, utilizaremos el módulo de digitalización. Considerando el contenido de las imágenes que estamos tratando y considerando que el objetivo es diferenciar la cobertura vegetal del resto de coberturas, los sitios de entrenamiento definidos se asocian a las clases: **sombras, suelo y vegetación** (figura 12). Se trata de clases de cobertura terrestre claramente definidas en cada una de las imágenes de muestra.

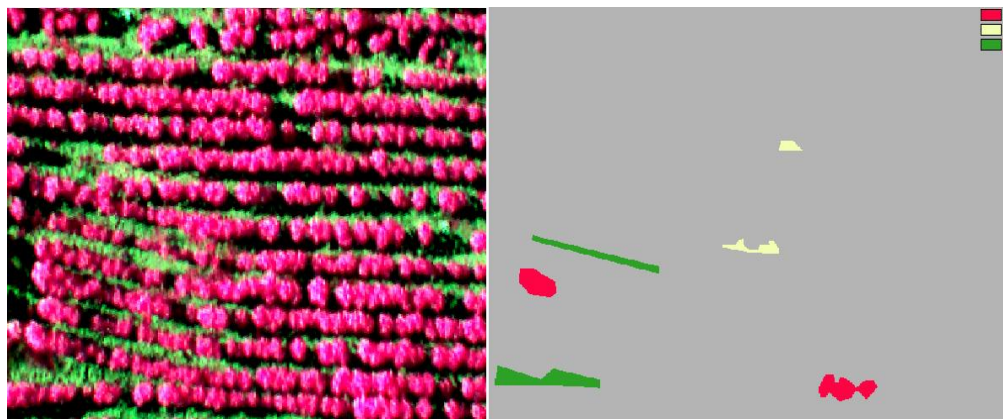


Figura 12. Ejemplo de digitalización y definición de los sitios de entrenamiento correspondiente a la pasada y *way point* 1 (imagen 1-1). Las códigos 1, 2 y 3 corresponden a las clases cultivo (rojo), sombras (blanco) y suelo (verde) respectivamente.

**b) Extracción de firmas espectrales.** A partir de las zonas de entrenamiento se crearon las caracterizaciones estadísticas de cada clase,

utilizando para ello el módulo MAKESIG. De esta forma se generó para cada imagen un archivo (extensión '.sig') en los que se incluyen los nombres de las bandas de las cuales se ha extraído la caracterización estadística, los valores mínimo, máximo y medio de cada banda, y la matriz de varianza/covarianza completa asociada con ese grupo de bandas de imagen multispectral para esa clase. Para examinar los contenidos de este archivo en detalle se utilizó el módulo SIGCOMP.

### c) Clasificación de las imágenes.

El método de clasificación usado fue el de las redes neuronales. Éste método se basa en el uso de redes neuronales artificiales que, se supone, imitan a las redes neuronales reales en el desarrollo de tareas de aprendizaje. Una neurona artificial es un objeto lógico que recibe diversas entradas, hace una suma ponderada de las mismas y produce una salida a partir de la aplicación de una función umbral a la media ponderada.

Estas redes surgieron a partir de las ideas en la publicación de McCulloch y Pitts (1943) donde se postulaba que las neuronas funcionan como dispositivos boléanos. Este postulado permitió generar una neurona como un modelo lineal seguido de una función activación booleana. Aquí, la función lineal representa la sinapsis (unión entre neuronas) y la agregación de la información, mientras que la función no lineal representa el procesamiento que hace la neurona.

Idrisi utiliza este concepto mediante el comando de clasificación MLP (figura 13).

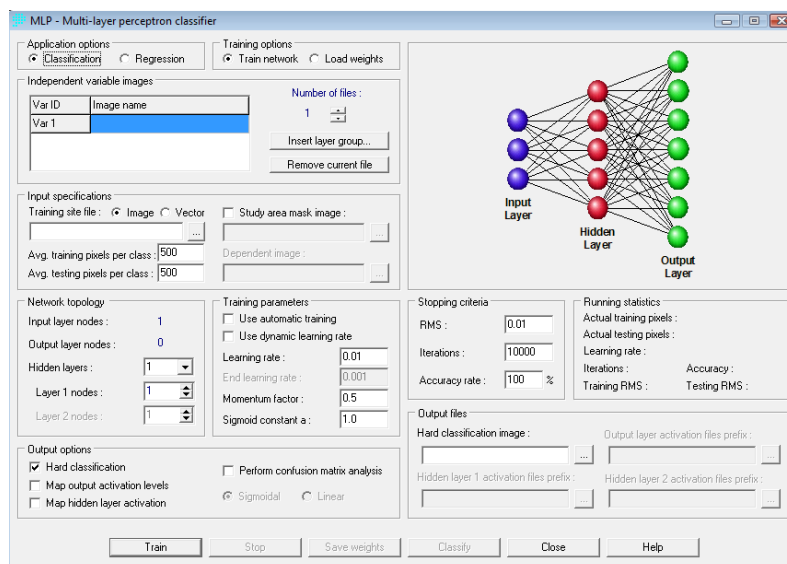


Figura 13. Detalle del cuadro de diálogo 'MLP' o de clasificación de la imagen por el método de redes neuronales que ofrece el software Idrisi.

#### 2.4.4 Evaluación de la concordancia.

Una vez obtenida la clasificación de las diferentes coberturas del terreno, se evaluó la concordancia de las variables, es decir, el grado de acuerdo entre los evaluadores que clasifican. Para estimar si la concordancia observada es superior a la que se esperaría encontrar por azar, en el caso de valores categóricos resulta conveniente utilizar el índice de concordancia kappa.

El resultado de una clasificación se asume en una Matriz de concordancia, en la que cada valor  $x_{ij}$  representa el número de ítems que han sido clasificados en la categoría  $i$  y los reales en la categoría  $j$ , tal que los valores  $x_{ij}$  de cada celda son las probabilidades conjuntas, que denotaremos por  $\pi_{ij}$ .

En términos conceptuales, la fórmula del coeficiente kappa puede expresarse de la siguiente forma:

$$\kappa = \frac{[(\Sigma \text{concordancias observadas}) - (\Sigma \text{concordancias atribuibles al azar})]}{[(\text{total de observaciones}) - (\Sigma \text{concordancias atribuibles al azar})]}$$

El índice kappa presenta un valor de 1 cuando la concordancia observada es perfecta, un valor de 0 cuando la concordancia observada es igual a la concordancia esperada por azar y valores inferiores a 0 cuando la concordancia observada es inferior a la concordancia esperada por azar.

Para interpretar orientativamente qué significado tiene el valor del coeficiente que se obtenga al calcular sobre nuestros datos, Landis y Koch (1977) propusieron la clasificación representada en la tabla 3.

Coeficiente Kappa	Fuerza de la concordancia
0.00.	Pobre
0.01-0.20	Leve
0.21-0.40	Aceptable
0.41-0.60	Moderada
0.61-0.80	Considerable
0.81-1.00	Casi Perfecta

Tabla 3. Interpretación de los valores del índice Kappa de evaluación de concordancia (Landis y Koch, 1977).

#### 2.4.5 Análisis de la imagen.

Conocida ya la fiabilidad y calidad de la clasificación de cada una de las imágenes, se procedió a realizar el análisis de la misma.

Puesto que nuestro objetivo era operar sobre la cobertura vegetal, se asignó el valor 0 a las clases suelo y sombras, y el valor 1, a la cobertura vegetal binarizando así la clasificación de la imagen (figura 14).

De esta forma, el NDVI se calculó a partir de los píxeles que se han clasificado como vegetación, evitando en gran medida la interferencia que producirían aquellos que se correspondan con clases diferentes. Para el cálculo del NDVI se usó la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)}$$

Siendo el NIR la radiación del infrarrojo cercano y R el valor del rojo del espectro visible. El intervalo de valores obtenido del NDVI, varía entre -1 y +1. El valor del NDVI puede variar en función del uso de suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona.

Como resultado de este proceso, se obtiene para cada una de las imágenes, un conjunto de valores del NDVI que representa exclusivamente la clase el cultivo (figura 14), valores que son comparados con los medidos con el radioespectrómetro.

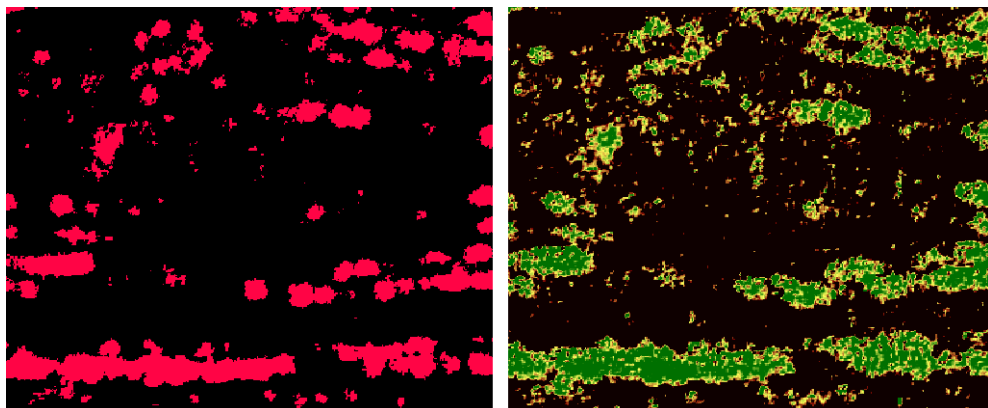


Figura 14. Resultado de imagen binarizada (izquierda), e imagen que representa los valores del NDVI (derecha) para la pasada 2, way point 4 (imagen 4-2).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primera instancia, los valores de NDVI se representan en el archivo imagen. La figura 15 representa, mediante escala de color, los valores de NDVI obtenidos con el proceso descrito en materiales y métodos para ocho de las veinte imágenes obtenidas. Con esta representación se puede realizar una primera interpretación de los resultados, hacer una primera valoración y tener una idea muy aproximada del estado del cultivo en cuanto a este índice se refiere y todo lo que éste puede representar.

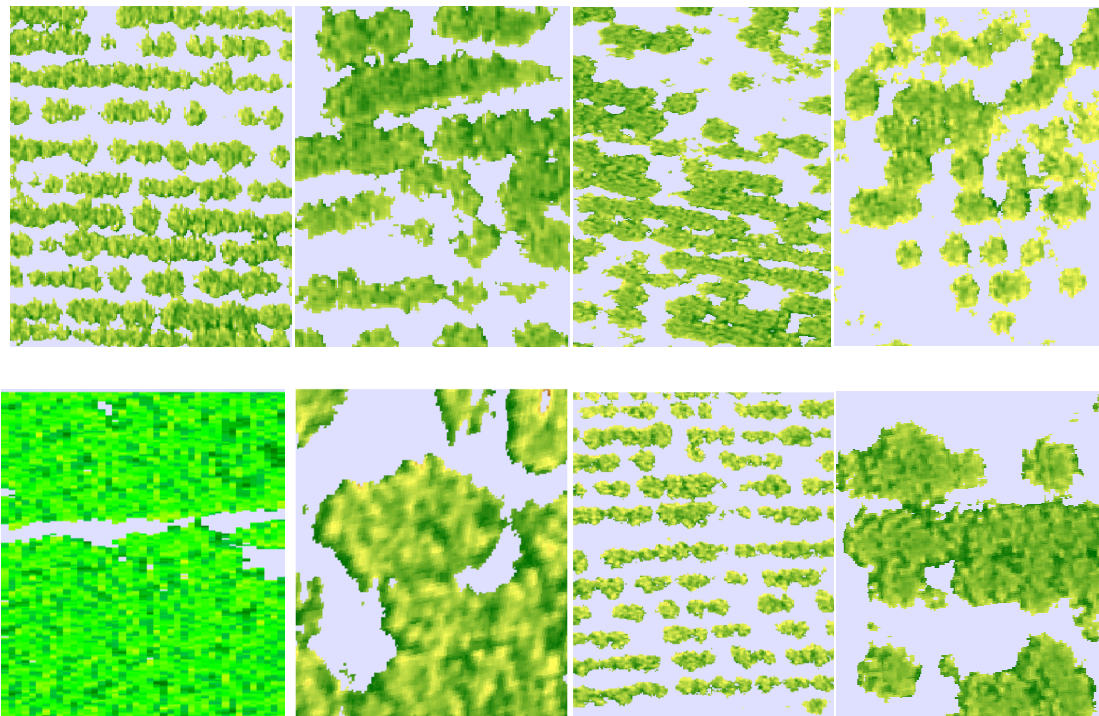


Figura 15. Ejemplo en detalle de los valores de NDVI, en escala de color, contenidos en los archivos imagen obtenidos tras el procesado de la muestra. De izquierda a derecha, y de arriba abajo, corresponden a la muestras 1-1, 2-1, 3-1 4-4, 1-3, 1-2, 4-2 y muestra 4-1.

En la tabla 4 se muestran los valores de NDVI obtenidos para cada una de las imágenes y calculados a partir del análisis de imagen y a partir de las lecturas del radiospectrómetro. Estos valores son la media de cada uno de los obtenidos para cada imagen y metodología empleada. Por problemas de lectura en el radiospectrómetro, no fue posible determinar los valores de NDVI



en los puntos WP3 de la pasada 1, WP4 de la pasada 2 y WP3 y WP4 de la pasada 5.

Los valores medios del valor del NDVI obtenidos de la muestra de análisis oscila desde un mínimo máximo de 0.8038, en el caso de la muestra 4-3, y un valor mínimo de 0,5764 en el caso de la muestra 2-3.

	Muestra	NVVI medio <i>tetracam</i>	NDVI medio radiospectrómetro
PASADA1-WP1	1-1	0.7054	0.4582
PASADA1-WP2	1-2	0.6595	0.4905
PASADA1-WP3	1-3	0.7700	-----
PASADA1-WP4	1-4	0.7325	0.4868
PASADA1-WP5	1-5	0.6871	0.4632
PASADA2-WP1	2-1	0.7519	0.5730
PASADA2-WP2	2-2	0.7513	0.6026
PASADA2-WP3	2-3	0.8038	0.5995
PASADA2-WP4	2-4	0.6289	-----
PASADA2-WP5	2-5	0.6753	0.5409
PASADA3-WP1	3-1	0.7001	0.4596
PASADA3-WP2	3-2	0.6314	0.4369
PASADA3-WP3	3-3	0.7726	0.4975
PASADA3-WP4	3-4	0.7629	0.4982
PASADA3-WP5	3-5	0.7196	0.5115
PASADA4-WP1	4-1	0.7970	0.6408
PASADA4-WP2	4-2	0.7486	0.6105
PASADA4-WP3	4-3	0.5764	-----
PASADA4-WP4	4-4	0.6322	-----
PASADA4-WP5	4-5	0.7696	0.5871

Tabla 4. Valores medios de NDVI deducidos del análisis de imágenes y a partir de las lecturas del radiospectrómetro.

La figura 16 representa los valores de NDVI calculados con el radiospectrómetro frente a los calculados a partir del análisis de imágenes. El ajuste lineal llevado a cabo arrojó un coeficiente de correlación  $R=0.7163$ , valor que muestra una significativa correlación. A la vista de esta figura, se observa que los valores obtenidos a partir del redioespectrómetro tuvieron un rango de variación mayor que los obtenidos a partir del análisis de imagen y además fueron menores que los obtenidos por análisis de imagen.

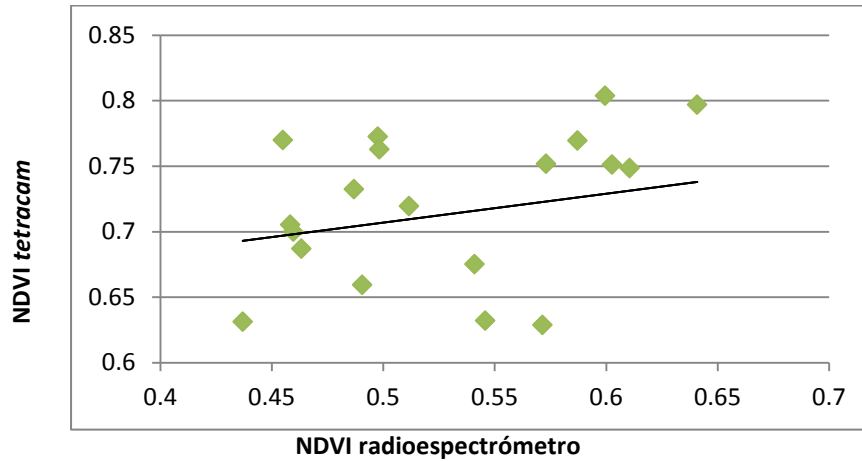


Figura 16. Relación entre los valores de NDVI calculado a partir del análisis de imágenes y los calculados a partir del radiospectrómetro. Coeficiente de correlación  $R=0.7163$ .

Similares resultados fueron obtenidos por Agüera et al. (2011) trabajando en parecidas condiciones que las de este trabajo. Igualmente, Reyniers y Vrinsts (2006) también obtuvieron resultados análogos trabajando con un cultivo de trigo, un radiospectrómetro similar e imágenes de satélite Ikonos.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, sobre un cultivo de girasol, se ha comparado el NDVI calculado a partir del análisis de imágenes tomadas desde un sensor montado sobre una plataforma aérea no tripulada y el calculado a partir de las medidas realizadas con un espectroradiómetro en tierra. La correlación obtenida entre ambas medidas fue altamente significativa ( $R=0.7163$ ). Por tanto, las imágenes tomadas con un sensor que capte las radiaciones roja e infrarroja cercana son útiles para determinar el NDVI del cultivo y deducir aquellas conclusiones que de él se puedan derivar.

La toma de imágenes no entraña gran dificultad y su procesado es muy intuitivo. A corto plazo, ésta metodología puede ser llevada a cabo por personal no cualificado, lo cual influye en que ésta propuesta sea más económica y versátil frente al uso de imágenes de satélite, las cuales, además, están limitadas por las condiciones atmosféricas (nubes, sobre todo) y por la periodicidad con las que se pueden tomar.

Una limitación de este tipo de sistemas para la captación de imágenes es la escasa autonomía de vuelo y capacidad de carga, lo cual limita el área de estudio que se puede cubrir y el sensor que se puede montar.

## 5. REFERENCIAS

**Agüera F., Carvajal F., Pérez M., 2011.** Measuring sunflower nitrogen status from an unmanned aerial vehicle-based system and an on the ground device. International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and spatial Information Sciences, UAV-g (unmanned aerial vehicle in geomatics) conference, Zurich, Switzerland, 2011.

**Alt, C., Stützel, H., Kage, H., 2000.** Modeling nitrogen content and distribution in cauliflower (*Brassica oleracea* L. *botrytis*). *Ann Bot* 86, 963–973.

**Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. and Huete, A.R., 1995.** A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, pp. 95-120.

**Blakeman, R.H., Bryson, R., Dampney, P., 2000.** Assessing crop condition in real time using high resolution satellite imagery. In: *Aspects of Applied Biology 60, Remote Sensing in Agriculture*, the Association of Applied Biologists, c/o Horticulture research International, Wellesbourne, Warwick CV35 9EF, UK, pp. 163-172.

**Bauer, M. E., 1985.** Spectral inputs to crop identification and condition assessment. *Proceedings of the IEEE*, 73, 1071-1085.

**Barnes E. M., Baker M. G., 2000.** Multispectral data for mapping soil texture: possibilities and limitations. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(6), 731-741.

**Barrientos A., Colorado J., Del Cerro J., Martínez A., Rossi C., Sanz. D., Valente J., 2011.** Aerial Remote Sensing in Agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fletes of mini aerial robots. *Journal of field Robotics* 28(5), 667-689.

**Cahn, M.D., Hummel, J.W., Brouer, B.H., 1994.** Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Science Society of America Journal*, 58, pp. 1240-1248.

**Goddard, T.W., Lachapelle, G., Cannon, M.E., Penney, D.C., McKenzie, R.C., 1995.** The potential of GPS and GIS in precision agriculture. In: *Proceedings Geomatique V: La Route de L'Innovation*, Montreal, PQ, Canada, 9-10 November, pp 75-89 (Canadian Institute of Geomatics).

**Feng W., Yao X., Zhu Y., Tian Y.C., Cao W.X., 2007.** Monitoring leaf nitrogen status with hyperspectral reflectance in wheat. *European Journal of Agronomy* 28 (2008) 394-404.

**Filella, I., Serrano, L., Peñuelas, J., 1995.** Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Science*, 35, pp. 1400-1405.

**Fix, E., Hodges, J.L. 1951.** Discriminatory analysis, nonparametric discrimination: Consistency properties. Technical Report 4, USAF School of Aviation Medicine, Randolph Field, Texas,

**Godwin R.J., 2000.** Precision farming- a multi-disciplinary approach for cereal production. Institute of Agricultural Engineers, Landwards, Summer 2000, pp- 4-9.

**Guo S., Dang T., Hao D., 2005.** Effects of fertilization on wheat yield,  $\text{NO}_3^-$ -N accumulation and soil water content in semi arid area of china. *Scientia Agri. Sin.* 38, 754-760.

**Han, S., Hedrickson, L., Ni, B., 2001.** Comparison of satellite remote sensing and aerial photography for ability to detect in-season nitrogen stress in corn. An *ASAE meeting presentation*. Paper No. 01-1142, ASAE, St Joseph, MI, USA.

**Han Y., Li M., Zhang X., Jia L., Chen X., Zhang F., 2005.** Precision Management of winter wheat based on aerial images and hyperspectral data obtained by unmanned aircraft. National Natural Science Foundation of China (30370812). China Agricultural University, Beijing, China.

**Hatfield, J. L. and Pinter Jr., P.J., 1993.** Remote sensing for crop protection. *Crop protection*, 12, 403-414.

**HGCA (2002).** Precision farming of cereals, practical guidelines and crop nutrition. Home Grown Cereals Authority, London.

<http://www.clarklabs.org>

<http://www.microdrones.com>

<http://www.tetracam.com>

**Jackson, R.D., 1984.** Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. Proceedings of the society of Photo-optical instrumentation Engineers, 475, 81-96.

**Landis JR, Koch GG. 1977.** The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics; 33: 159-174.

**MAFF (2000).** Fertiliser recommendations for agricultural and horticultural crops (RB 209). Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, The Stationery Office. London

**W. S. McCulloch y W. Pitts, 1943.** "A logical calculus of the ideas immanent in neurons activity", *Bull. Math. Biophys.*, **5**, 115-133.

**Miller P., Lane A., Wheeler H., 2000.** Matching the application of fungicides to crop canopy characteristics. Proceedings of the BCPC Conference-Pests and Diseases 2000. Brighton, UK, 13-16 november 2000, pp 629-636. British Crop Protection Council.

**Pearson, J.P., 1984.** *Control of Crop Productivity*, Academic Press, New York.

**Peñuelas, J., Filella, I., Serrano, L., Save, R., 1996.** Cell Wall elasticity and wáter index (R970 nm/R900 nm) in wheat under different nitrogen availabilities. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, pp. 373-382.

**Reyniers, M., Vrinsts, E., Baerdemaeker, J., 2004.** Fine-scaled optical detection of nitrogen stress in grain crops. *Optical Engineering*, **43**, pp. 3119-3129

**Reyniers, M., Vrinsts, E., 2006.** Measuring wheat nitrogen status from space and ground-based platform. *International Journal of Remote Sensing*, **27(3)**, pp. 549-567. Plant tissue test for predicting nitrogen fertilizer requirement of winter wheat. *Agron. J.* **81**, 502-507.

**Roth G.W., Fox R.H., 1989.** Plant tissue test for predicting nitrogen fertilizer requirement of winter wheat. *Agron. J.* **81**, 502-507.

**Santhosh K., Soizik L., Grant M., Grant M., George A., 2003.** Remote Sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment* **88** (2003) 157-169.

**Schneider, A.A., Miller, J.F., 1981.** Description of sunflower growth stages. *CropScience* **21**: 901-903

**Scottford, I.M., Miller, P., 2005.** Applications of Spectral Reflectance Techniques in Northern European Cereal Production: A Review. *Biosystems Engineering*, 90 (3), pp. 235–250

**Shibusawa S., Made Anom S. W. I., Sata S., Sasao A., Hirako, 2001.** Soil mapping using real time soil spectrophotometer. In: *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Precision Agriculture (ECPA)*, Montpellier, France, 18-20 June, pp 485-490.

**Sylvester-Bradley R; Spink J; FoulkesMJ; Bryson R J; Scott RK; Stokes D T; KingJ A; Parish D; Paveley N D; Clare R W, 2000.** Sector challenge project—canopy management inpractice. In: *Proceedings of the HGCA 2000 Crop Managementinto the Millennium Conference*, Cambridge, 6–7January 2000, pp 11\_1–11\_14. Home Grown CerealsAuthority, London

**Taylor J C; Wood G A; Welsh J P, 2000.** Exploring management strategies for precision farming of cereals assisted by remote sensing. In: *Remote Sensing in Agriculture* (Bryson R J; Howard W; Riding A E; Simmonds L P; Steven M D, eds). *Aspects of Applied Biology*, 60, 53–60

**Thomas, J.R., Oerther, G.F., 1972.** Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. *Agronomy J.* 64, 11-13.

**Wood G A; Welsh J P; Godwin R J; Taylor J C; Earl R; Knight S; Carver M F F, 2000.** Precision farming: seed-rate and nitrogen interactions. In: *Proceedings of the HGCA 2000 Crop Management into the Millennium Conference*, Cambridge, 6–7 January 2000, pp 8\_1–8\_12. Home-Grown Cereals Authority, London

**Woodard, H.J., Bly, A., 1998.** Relationship of nitrogen management to winter wheat yield and grain protein in South Dakota. *J. Plant Nutr.* 21, 217–233.

**W. S. McCulloch y W. Pitts. 1943** "A logical calculus of the ideas immanent in neurons activity", *Bull. Math. Biophys.*, 5, 115-133.

**Zhang, Q., Zhang L., Bi. H., 1996.** Accumulation and distribution of carbohydrate and nitrogen and their relationship to grain protein content in wheat. *Acta Agri. Boreali-Sin.* 11, 57-62.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Muchas gracias a Francisco Agüera, Fernando Carvajal y Mónica Pérez

## RESUMEN

La agricultura de precisión es un sistema de producción que lleva implícito el control de múltiples variables relacionadas con el manejo de los cultivos de una manera más localizada. A diferencia del manejo tradicional, establece metodologías que permiten un profundo análisis de las características del suelo, la morfología del terreno y el crecimiento del cultivo. La información obtenida permite establecer estrategias de manejo de cultivo más apropiadas. Los sensores remotos son un componente básico de la agricultura de precisión y en particular, las técnicas de captación de imágenes desde sensores remotos aéreos cobran especial relevancia.

La utilización de sensores remotos en plataformas espaciales han sido el método más frecuente para obtener imágenes del territorio a evaluar, sin embargo son costosos, están muy condicionados por la meteorología y tienen poca disponibilidad, de ahí que su uso en explotaciones comerciales sea muy escaso.

En los últimos años, la reducción en el coste de los sistemas de posicionamiento global y el desarrollo de pequeños sensores de inercia ha motivado la creación por parte de compañías a desarrollar vehículos aéreos no tripulados (UAVs) los cuales nos permiten obtener imágenes de manera más localizada, con un alto grado de resolución y con mayor control del momento en que se desea obtenerlas.

Éste trabajo ha comparado el valor del índice de vegetación normalizado (NDVI), deducido desde imágenes obtenidas desde sensores instalados en dispositivos aéreos no tripulados con los obtenidos mediante un dispositivo terrestre, consistente en un radiómetro, sobre un cultivo de girasol. Los resultados han mostrado una significativa correlación entre ambos sistemas de medida. El trabajo pone de manifiesto, por un lado, que las imágenes tomadas con un sensor que capte las radiaciones roja e infrarroja cercana son útiles para determinar el NDVI del cultivo, y por otro, la metodología empleada ofrece mayor versatilidad con respecto al uso de imágenes de satélite.

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

