

TRABAJO FIN DE MÁSTER

POSIBILIDAD DE USO DE IMÁGENES AÉREAS MULTIESPECTRALES Y RADIOMETRÍA DE CAMPO EN LA EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE NITRÓGENO EN CEREALES.

Autor :Beatriz Sanza Moral

***Directores: Dra. M^a Auxiliadora Casterad Seral
Dra. Dolores Quílez Sáez de Viteri***

Máster Universitario en

Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección

Noviembre de 2012



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

La importancia del nitrógeno en la producción agrícola genera investigaciones en la búsqueda de un diagnóstico de fertilización nitrogenada adecuado para mejorar las recomendaciones de abonado en los cultivos. En este trabajo se aborda la obtención de información de imágenes multiespectrales aeroportadas y de radiometría de campo como apoyo a la gestión de la fertilización nitrogenada en cereales. El estudio se ha realizado en dos ensayos de estrategias de fertilización nitrogenada localizados en la provincia de Huesca, uno de maíz en el término municipal de Almudévar y otro de arroz en el término municipal de Villanueva de Sigena.

Se han utilizado imágenes aéreas multiespectrales de muy alta resolución espacial con el propósito de tener información que ayude a diagnosticar el estado nutricional del cultivo. Esta información se ha completado con medidas radiométricas y datos sobre el contenido en clorofila de las plantas tomados en campo que permiten validar la información derivada de las imágenes y poder establecer relaciones entre el contenido de clorofila y reflectividad. Ello ha requerido la puesta a punto de los equipos de muestreo, el diseño del muestreo de campo y la elaboración de protocolos de medida.

La adquisición de las imágenes multiespectrales con una alta resolución tiene aún un elevado coste. A través del análisis de la influencia de la variación del tamaño de píxel en la información derivada de las imágenes del trabajo (índices y bandas) se ha podido determinar el uso de resoluciones menores en las imágenes sin cambios en la información contenida, pudiendo así reducir los costes de adquisición. Se han comparado dos modelos de calibración radiométrica de las imágenes y se ha extraído de una imagen del ensayo de maíz información espectral de las bandas del verde, rojo e infrarrojo así como dos índices de vegetación, el NDVI y el GNDVI, información que se relaciona con el contenido en clorofila de las plantas. Algunos resultados preliminares indican la necesidad de ajustar aspectos en relación a la representatividad de las muestras y medidas realizadas si se quiere caracterizar con ellas el comportamiento medio en la parcela de las diferentes variables estudiadas.

La obtención de información ha sido abundante, teniendo que ser analizada en estudios posteriores y comparada con diferentes parámetros usados en la línea de investigación en la que se enmarca el trabajo para la obtención de resultados.

Palabras Clave: Radiometría, índices de vegetación, imagen multiespectral, fertilización nitrogenada, maíz.

Abstract

The importance of nitrogen in agricultural production generates investigations in the search of a diagnosis of appropriate nitrogen fertilization in order to improve the recommendations of subscriber in the crops. This paper deals with obtaining information from airborne platforms and multispectral images of radiometry, as field support to the management of nitrogen fertilization in cereals. The study has been carried out in two trials of strategies of nitrogen fertilization located in the province of Huesca, one of corn in the municipal term of Almudevar and another of rice in the municipality of Villanueva de Sigena.

Multispectral aerial images of very high spatial resolution have been used with the purpose of having information that will help to diagnose the nutritional status of the crop. In addition, this information has been completed with radiometric measures and data on the chlorophyll content of the plants, taken in the field to validate the information derived from the images, and to be able to establish relationships between the content of chlorophyll and reflectivity. In order to achieve this aims the development of the sampling equipment, the design of the field sampling and the development of measurement protocols have been implemented.

However, the acquisition of the multispectral images with a high resolution has yet a high cost. Through the analysis of the influence of the variation of the pixel size on the information, derived from the images of the work (indexes and bands) the use of lower resolutions in the images without changes to the information contained herein has been determined, thereby reducing the costs of acquisition.

Two models of radiometric calibration of the images have been compared and information of the bands on the green, red and infrared as well as two vegetation indices, the NDVI and the GNDVI (information that relates to the chlorophyll content of plants) has been extracted from an image of the test of maize spectral. Some preliminary results indicate the necessity to adjust aspects in relation to the representativeness of the samples and measurements performed, if you want to characterize the behavior with the means in the plot of the different variables studied.

Moreover, the acquisition of information has been plentiful even though it has to be analysed in subsequent studies, and compared with different parameters used in the line of research in which the work is framed for the achievement of results.

Key Words: *radiometry, vegetation indices, multispectral image, nitrogen fertilization, corn.*

Índice

1.	Introducción	pág. 1
1.1.	La importancia del abonado nitrogenado.....	pág. 1
1.1.	Abonado nitrogenado y teledetección	pág. 1
2.	Objetivos	pág. 3
2.1.	Objetivos académicos.....	pág. 3
2.2.	Objetivos en relación a los proyectos de investigación	pág. 3
3.	Zonas de estudio	pág. 4
3.1.	Ensayo de maíz	pág. 4
3.2.	Ensayo de arroz.....	pág. 6
4.	Extracción de información de imágenes aéreas multiespectrales	pág. 8
4.1.	Caracterización de las imágenes	pág. 8
4.2.	Calibración radiométrica de las imágenes.....	pág. 10
4.2.1.	Superficies de control sobre las que se realizan medidas radiométricas	pág. 11
4.2.2.	Procedimiento para la toma de medidas radiométricas	pág. 13
4.2.3.	Post-procesamiento de las medidas radiométricas para la obtención de reflectividades	pág. 14
4.2.4.	Extracción de la información necesaria para realizar la calibración	pág. 16
4.2.5.	Determinación de los modelos de ajuste.....	pág. 18
4.2.6.	Medidas a tener en cuenta en estudios futuros.....	pág. 20
5.	Repercusión de la resolución espacial de las imágenes en relación al tamaño de la parcela experimental	pág. 21
5.1.	Obtención de capas ráster a diferentes tamaños de píxel	pág. 21
5.2.	Extracción para cada parcela de los niveles digitales medios de cada banda e índices	pág. 23
5.3.	Análisis de la información estadística. Valoración del efecto de la resolución de la imagen sobre la información obtenida	pág. 24
6.	Adquisición de información radiométrica en el ensayo de maíz.....	pág. 28
6.1.	Puesta a punto del equipo de muestreo	pág. 28
6.2.	Diseño del muestreo radiométrico	pág. 29
6.3.	Toma de las medidas radiométricas	pág. 32
6.3.1.	Problemas detectados	pág. 33
6.4.	Muestreo en campo de información adicional.....	pág. 33
7.	Extracción de información de la imagen multiespectral del ensayo de maíz.....	pág. 34
7.1.	Los índices espectrales	pág. 34
7.2.	La extracción de información	pág. 35
8.	Extracción de información derivada de teledetección y su relación con el contenido en clorofila en el ensayo de maíz	pág. 38
8.1.	Tamaño de la muestra y representatividad.....	pág. 38
8.2.	Relación de datos de las imágenes con contenido en clorofila	pág. 41
8.3.	Caracterización espectral de los diferentes tratamientos de abonado nitrogenado	pág. 42
9.	Recomendaciones para estudios posteriores	pág. 43

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo desarrollado durante la estancia en prácticas se enmarcan dentro de dos proyectos de investigación desarrollados en el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón: “Estrategias agronómicas para optimizar el uso del nitrógeno en maíz en sistemas de riego por aspersión (AGL2009-12897-C02) y “Fertilización con subproductos ganaderos: valoración agronómica y ambiental” (RTA-2010-00126).

La dirección de las prácticas por parte de dicha institución ha sido llevada a cabo por Dra. María Auxiliadora Casterad Seral y Dra. Dolores Quílez Sáez de Viteri, investigadoras pertenecientes a la Unidad de Suelos y Riegos.

En estos proyectos se ha planteado evaluar la posibilidad de usar imágenes multiespectrales captadas desde avión para conocer el estado nutricional del cultivo y ajustar la fertilización nitrogenada, habiendo participado en las actividades desarrolladas con este fin. Dicha evaluación, en el año 2012, se realiza sobre dos ensayos experimentales, uno de maíz y otro de arroz, presentados más adelante en el Apartado 3.

1.1 La importancia del abonado nitrogenado

El aporte de nutrientes al suelo para obtener una mejora en la producción agrícola es algo que se lleva practicando desde hace siglos. En todo este tiempo se ha ido modificando la forma y la capacidad de realizar el aporte de dichos nutrientes. La agricultura actualmente tiene la necesidad de ajustar las dosis y las formas de aplicación de los nutrientes a los cultivos para que estos sean aprovechados de forma eficiente y que puedan generar beneficios económicos a la vez que mantengan o incrementen la producción de alimentos con el menor impacto posible sobre el medio ambiente.

El nitrógeno (N) es considerado el nutriente más importante para la producción vegetal debido a las cantidades requeridas por los cultivos y a la frecuencia con que se observan deficiencias en suelos agrícolas. Por lo tanto, la agricultura de altos rendimientos depende del uso de fertilizantes nitrogenados. El diagnóstico de las necesidades de N de los cultivos para alcanzar el máximo rendimiento biológico y/o económico contribuye a:

- a) maximizar la eficiencia de uso del N aplicado
- b) b) reducir los impactos ambientales que se generan tanto con aplicaciones excesivas (contaminación del suelo, aire y agua) como con aplicaciones deficientes (degradación del suelo por disminución de las reservas naturales de N, fundamentalmente N orgánico).

La importancia del N en la producción agrícola genera numerosas investigaciones y experimentaciones en la búsqueda de métodos de diagnóstico de la fertilidad nitrogenada para recomendaciones de fertilización. En general, los métodos de diagnóstico que pretenden predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada se basan en la disponibilidad de N en suelo y/o en planta y el requerimiento previsto para un determinado nivel de rendimiento.

1.2 Abonado nitrogenado y teledetección

Los cultivos responden positivamente al abonado nitrogenado, por ello se ha investigado mucho sobre la fertilización del N y es difícil encontrar una fórmula general de recomendación de dosis de nitrógeno, ya que esta puede variar en función de diversos parámetros como cultivo, actividad microbiana y mineralizadora, residuos, tipo de riego, cultivo precedente, tipo de abono y su fraccionamiento, etc. El método convencional de aplicación de nitrógeno suele ser uniforme y no considera las variaciones espaciales ni temporales del crecimiento del cultivo, ni los cambios que el aporte de nitrógeno desde el suelo puede tener sobre el cultivo debido a los cambios de los factores ambientales (Xue and Yang, 2008).

En una planta, la cantidad de nitrógeno está relacionado con el contenido de clorofilas en la hoja. Este contenido se puede medir con medidores de clorofila, que junto con los sistemas de teledetección pueden ser herramientas importantes para determinar el estado nutricional del cultivo. La teledetección permite el estudio de la variabilidad espacial de un cultivo y además puede aplicarse a zonas amplias.

Según Blackmer y Schepers (1996) la teledetección permite una rápida evaluación de amplias áreas que no es fácil cubrir con medidas de clorofila hechas con métodos tradicionales. Las medidas de reflectividad hechas en un cultivo en sus fases de crecimiento se pueden usar fácilmente para detectar la variabilidad del mismo (Xue and Yang, 2008). La teledetección tiene un gran potencial para muchas aplicaciones porque puede registrar amplias zonas, es un método no destructivo y proporciona una adquisición en tiempo real de información sobre las condiciones ecofisiológicas de las plantas. (Inoue, 2003). Wiegand et al. (1986) propusieron la integración de la teledetección en los modelos de crecimiento de cultivo. Según Plant et al (2000), los datos de teledetección obtenidos con vuelo pueden proporcionar detalles y datos de distribución espacial del crecimiento del cultivo y su desarrollo.

Las imágenes aéreas registran generalmente información sobre la reflectividad del cultivo en las bandas del visible y el infrarrojo (400-900nm). El estudio de los parámetros biofísicos mediante teledetección es complejo porque la reflectividad del cultivo está determinada no sólo por la morfología y fenología de la planta sino también por las características del suelo, radiación, ángulo de observación y condiciones atmosféricas (Huete and Jackson, 1985).

En estas longitudes de onda tienen mucha influencia el contenido en clorofila y la estructura de la hoja. Los pigmentos de clorofila absorben principalmente en la región del azul y el rojo del espectro visible y reflejan en la zona del verde. La reflectividad del cultivo en el visible y en el infrarrojo cercano se utiliza para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz (Blackmer et al., 1995).

El contenido en clorofila es uno de los parámetros biofísicos más relacionadas con la cantidad de nitrógeno en planta, dado que la mayor parte de éste se encuentra en las moléculas de clorofila (Daughtry et al., 2000). Distintos trabajos han demostrado la aplicabilidad de datos de alta resolución espectral en la estimación del contenido en clorofila de la hoja, proponiendo la utilización de diferentes índices espectrales (Filella et al., 1995, Haboudane et al, 2002, Sripada et al., 2008, Isla y Lopez Lozano, 2005, Kostrzewski et al. 2002) Estos índices generalmente combinan la reflectividad de dos o más longitudes de onda y pueden correlacionarse con variables biofísicas del cultivo (Shoppiana et al, 2006). Uno de los índices más usados es el NDVI (índice de vegetación normalizada formulado por Rouse et al., 1974). Está basado en la fuerte absorción en el rojo y la alta reflectividad en el infrarrojo. Este índice se propone para la estimación de biomasa (Chang et al, 2005). Una de las variables con las que está relacionado es con la concentración de clorofila la cual a su vez está relacionada con el rendimiento del cultivo. Uno de los inconvenientes que presenta es que cuando el contenido en clorofila, la fracción vegetal o el LAI (índice de área foliar) presentan valores moderados a altos, el NDVI es menos sensible (Aparicio et al, 2005). Según Gitelson et al. (1996), bajo estas condiciones es más sensible el GNDVI (Índice de vegetación verde de diferencia normalizada formulado por Gitelson et. al, 1996) para la variación de la biomasa, ya que la banda del verde que es la que se usa para el cálculo del GNDVI es más sensible que la banda del rojo usada en el NDVI. El GNDVI se ha visto que presenta una buena correlación con el contenido de nitrógeno de las plantas (Wright, 2003).

El uso de la teledetección y de los índices de vegetación pueden ser útiles para determinar variaciones en el cultivo y requerimientos de nutrientes, ayudando en la toma de decisiones de aplicación del abonado nitrogenado.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos académicos

- Desarrollar y profundizar los conceptos teóricos adquiridos en los diferentes módulos del curso académico y poder llevarlos a la práctica para conseguir unos fines específicos.
- Colaborar en un equipo multidisciplinar y asimilar las rutinas dentro de un trabajo de investigación.
- Familiarizarse y conocer procedimientos, protocolos, equipamiento y software relacionado con tecnologías de información geográfica aplicadas en los proyectos en los que se participa.

2.2 Objetivos en relación a los proyectos de investigación

- Evaluar la calidad de las imágenes adquiridas desde avión con el sensor DMSC-2K System y analizar las correcciones que precisan.
- Estudiar la repercusión de la resolución espacial de las imágenes en relación al tamaño de la parcela experimental.
- Diseñar los muestreos de campo y puesta a punto las herramientas necesarias para la adquisición de la información radiométrica a utilizar en los proyectos.
- Estudiar la relación existente entre fertilización nitrogenada del cultivo e información multiespectral derivada de imágenes aéreas y radiometría de campo.

3. ZONAS DE ESTUDIO

3.1. Ensayo de maíz

Ensayo localizado en el término municipal de Almudévar provincia de Huesca (Figura 1), cuyo diseño experimental consta de 5 tratamientos evaluados en tres ambientes (Alto, Medio, y Bajo) de disponibilidad de nitrato inicial en el suelo antes de la siembra. Las estrategias de fertilización aplicadas son:

- Un tratamiento control sin fertilización nitrogenada (T0)
- Una dosis fija establecida teniendo en cuenta las necesidades de nitrógeno del cultivo (T1)
- Una dosis establecida teniendo en cuenta las necesidades de nitrógeno del cultivo, corregida por el contenido de N mineral del suelo. (T2)
- Una dosis establecida según las lecturas del medidor de clorofila o SPAD en V12-V15. (T3)
- Un tratamiento sobrefertilizado (T4)

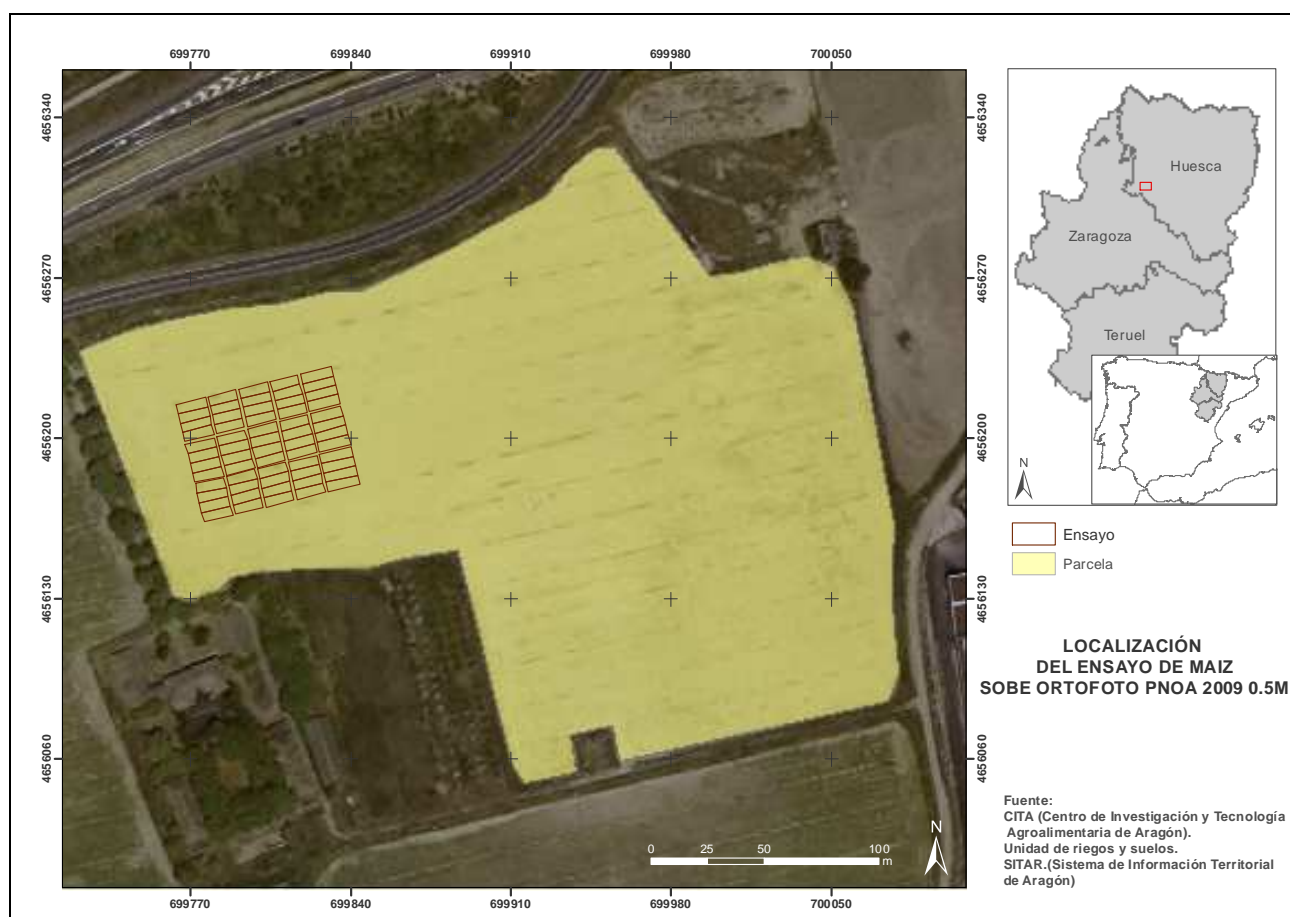


Figura 1: Localización del ensayo de maíz 2012.

El ensayo consta total de 60 parcelas de 4m x 13m, repartidas en 20 parcelas por cada una de las zonas del ensayo correspondientes a los tres ambientes iniciales, alto medio y bajo de contenido de N mineral en el suelo (Figura 2). Para cada uno de los tratamientos descritos habrá un total de 20 parcelas (5 tratamientos x 4 repeticiones) por zona. Cada parcela tiene seis filas de maíz (a distancias de 70 cm) y unas 60 plantas por fila, separadas entre si aproximadamente 15 cm.

Carretera. Vía de servicio hacia Almodévar					
Camino de acceso					
	1	5	9	13	17
	2	6	10	14	18
	3	7	11	15	19
	4	8	12	16	20
	21	25	29	33	37
	22	26	30	34	38
	23	27	31	35	39
	24	28	32	36	40
	41	45	49	53	57
	42	46	50	54	58
	43	47	51	55	59
	44	48	52	56	60
					Zona Alta
					Zona Media
					Zona Baja

Figura 2: Distribución de las parcelas del ensayo de maíz.

El aspecto en campo del ensayo de maíz se puede apreciar en la Figura 3.



Figura 3: Ensayo de maíz de 2012 en Almodévar.

3.2. Ensayo de arroz

Ensayo localizado en el término municipal de Villanueva de Sigena, provincia de Huesca (Figura 4), cuyo diseño experimental está formado por cuatro bloques repartidos en tres fajas diferentes. El abonado nitrogenado puede ser de purín o mineral con diferentes dosis. Se combinan las siguientes aplicaciones.

- Tratamiento presiembra de purín (P) a dos dosis diferentes complementado con N mineral en cobertera. Las dosis corresponden a las necesidades teóricas de N del cultivo (D2) y a un 70% de las necesidades teóricas de N del cultivo (D1).
- Tratamientos de N mineral (M) a distintas dosis que incluyen: N solo en presiembra, N solo en cobertera y la combinación de N en presiembra y cobertera.



Figura 4: Localización del ensayo de arroz 2011.

El aspecto en campo del ensayo de arroz se puede apreciar en la Figura 5.



Figura 5: Ensayo de arroz de 2012 en Villanueva de Sigena.

El ensayo de arroz está compuesto por bandas de 6 m de ancho y 175 m de largo. El diseño del ensayo es en splits Plot donde a cada banda se le ha asignado los tratamientos (o factores) principales, dosis de purín D2, dosis de purín D1 y N mineral. Cada banda esta dividida en subparcelas donde se aplican los tratamientos secundarios. Hay 6 tratamientos secundarios para cada banda de purín, en parcelas individuales de 12 m de largo y 15 tratamientos secundarios en la banda de N mineral con parcelas de 5 m de largo (Figura 6). El orden de los tratamientos va variando en los diferentes bloques. En total hay 48 parcelas abonadas con purín y 60 con mineral (Figura 7).

Faja 1															
Bloque 1	P			P			P			P			P		
	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
	P			P			P			P			P		
	P			P			P			P			P		
Bloque 2	P			P			P			P			P		
	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
	P			P			P			P			P		
	P			P			P			P			P		
Bloque 3	P			P			P			P			P		
	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
	P			P			P			P			P		
	P			P			P			P			P		
Bloque 4	P			P			P			P			P		
	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
	P			P			P			P			P		
	P			P			P			P			P		

Figura 7: Diseño de fertilización del ensayo de arroz. P, parcelas con tratamiento de purín en presembrado, M parcelas abonadas únicamente con N mineral

4. EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN DE IMÁGENES AÉREAS MULTIESPECTRALES

4.1 Caracterización de las imágenes

En este trabajo se han utilizado imágenes aéreas captadas en un vuelo comercial realizado por RS Servicios de teledetección S.L. con avión. El sensor utilizado fue una cámara digital multiespectral específicamente diseñado para la teledetección de superficies vegetales a bajo coste, denominado Digital Multi-Spectral Camera (DMSC) System desarrollado por la empresa SpecTerra Services.

Las características del sensor son las indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del Sensor DMSC (SpecTerra Services, 2007)

Especificaciones	DMSC-2K System
Formato	Sensor aeroportado utilizando 4 interlineas de transferencias. Matriz CCD 2048x2048 pixel.
Resolución radiométrica	Digitalización de 14 bits, con registro de 16 bits.
Resolución espectral	4 filtros espectrales de anchos de banda estrechas, independientes y sustituibles. Filtros de 10nm de anchura utilizables en un rango de 400-900nm.
Especificaciones de la lente	Montura Nikon F, 24-28mm con lentes de distancia focal fija
Ángulo de visión	Máximo 17°, respecto al nadir
Resolución espacial	De 0.15m a 1.5m
Plataforma	Avión monomotor ligero con un agujero de 6 “de diámetro de visión

Para el presente trabajo las 4 bandas de las imágenes capturadas tienen 20nm de anchura centrados sobre los siguientes espectros de reflectancia principales que caracterizan la vegetación:

- Banda 1: Azul (Blue)= 450nm (fuerte absorción por los pigmentos de la hoja)
- Banda 2: Verde (Green)=550nm (reflectancia y transmitancia relativamente más altas que en el resto del visible)
- Banda 3: Rojo (Red)= 675nm (fuerte absorción por las clorofilas de las plantas)
- Banda 4: Infrarrojo cercano (NIR)=780 nm (alta reflectancia de las plantas)

Las imágenes suministradas están preprocesadas, habiéndoseles realizado una corrección de la distorsión que puede producir la cámara y del brillo de la escena (SpecTerra Services, 2007). Además las imágenes están ortorectificadas.

a) Ensayo de arroz

Para el ensayo de arroz se ha trabajado con dos imágenes, una tomada el 28 de julio de 2011 y otra el 30 de julio 2012. Ambas imágenes son de finales del mes de julio cuando el cultivo de arroz está al final de su periodo vegetativo y aún no ha desarrollado la panícula, para evitar así el efecto de la misma en la reflectividad del cultivo.

Las tomas de las imágenes se realizaron en condiciones estables de iluminación y visibilidad, dentro de la hora de máxima iluminación solar

Problemas en el vuelo del año 2011 llevaron a la adquisición de una imagen que no abarca toda la superficie del ensayo (Figura 8). La imagen de 2011 tiene 1520 columnas y 1648 filas mientras que la de 2012 tiene 3360 columnas y 3361 filas. La resolución espacial de ambas imágenes es de 0.1m.

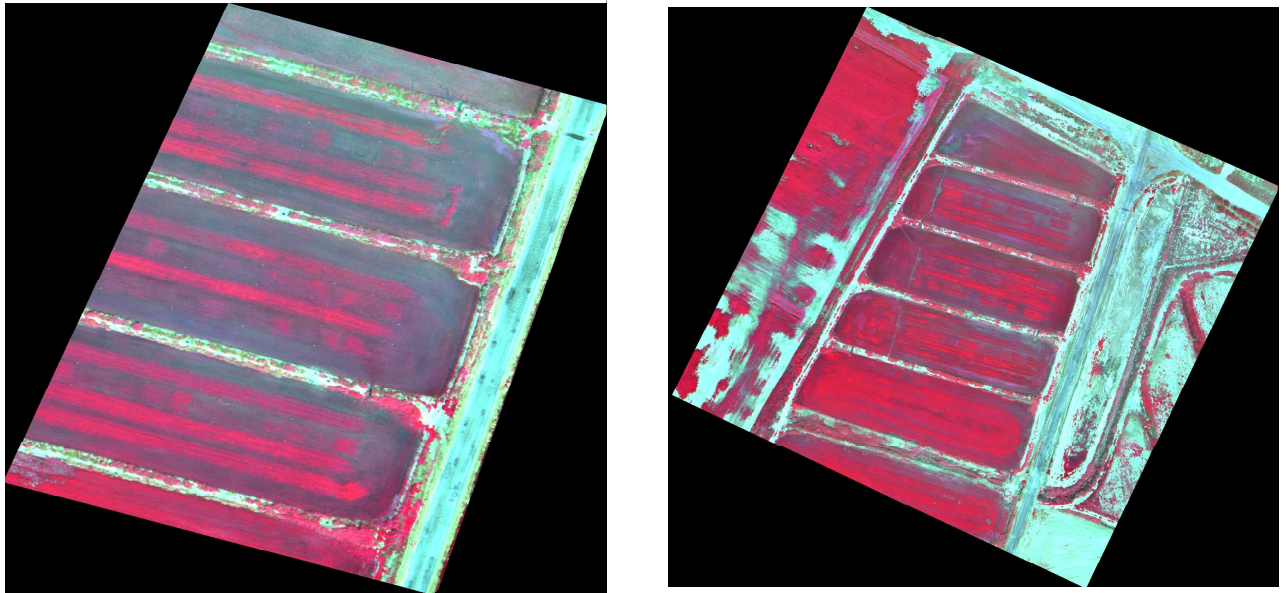


Figura 8: Imágenes falso color (RGB:4/3/2) del ensayo de arroz tomadas el 28 de julio (izquierda) de 2011 y el 30 de julio de 2012 (derecha) en el término municipal de Villanueva de Sigüenza, con cámara digital multispectral sobre vuelo comercial.

La imagen de 2011 tiene un fallo de asignación de coordenadas. Se suministró por parte del proveedor con un recorte en la parte occidental, presentando solo una imagen parcial del ensayo de arroz. Durante la realización del vuelo para la toma de imagen hubo un problema con el sistema de posicionamiento lo cual hizo que las coordenadas de referencia de la imagen no estén bien posicionadas.

Se comprobó que la imagen tiene cierto desplazamiento, y al superponerla sobre la imagen de 2012 se vio que está distorsionada sobre todo en sus zonas laterales. Esto se puede comprobar fijándose en infraestructuras como por ejemplo la carretera que en ambas imágenes de igual resolución tendrían que tener la misma anchura no siendo así, tal y como se aprecia en la Figura 9.

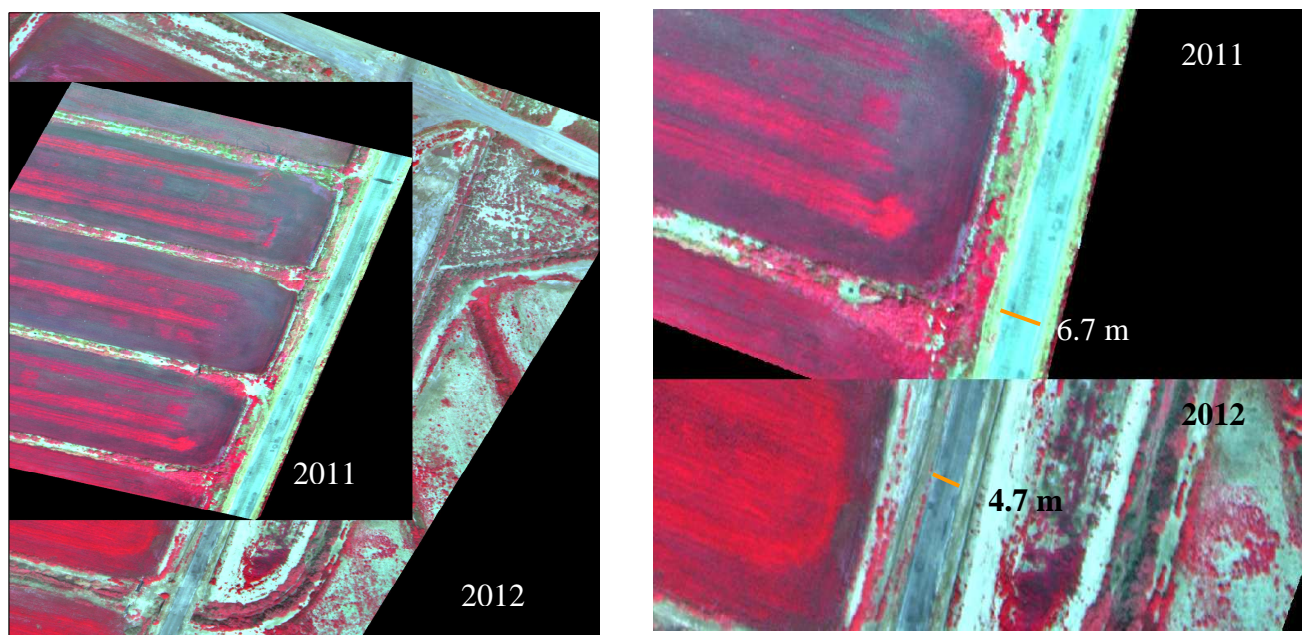


Figura 9: Imágenes del ensayo de arroz de 2011 y 2012 superpuestas, donde se muestra las diferencias de anchuras entre ambas imágenes. (RGB: 4/3/2).

b) Ensayo de maíz

Del ensayo del cultivo de maíz se capturó una imagen del 10 de julio de 2012 cuando el cultivo estaba en el estadio V15 antes del desarrollo de la panícula (Figura 10). Dicha imagen tiene 2260 columnas y 2251 filas y una resolución espacial de 0.15m. La calidad de la imagen es buena.

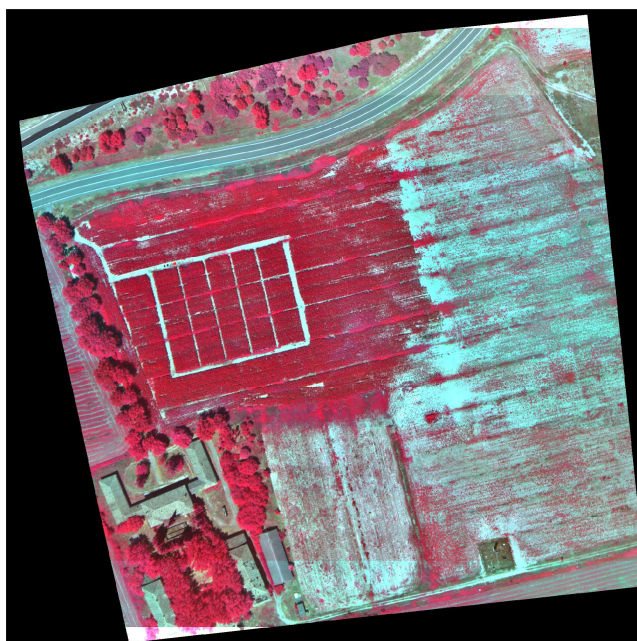


Figura 10: Imagen del ensayo de maíz tomada el 10 de julio de 2012 en el término municipal de Almodóvar, con cámara digital multiespectral sobre vuelo comercial. (RGB: 4/3/2).

4.2 Calibración radiométrica de las imágenes

Existen diferentes métodos de calibración radiométrica de imágenes (Dinguirard y Slater, 1999; Honkavaara et al, 2009). La respuesta radiométrica de una cámara sigue normalmente un modelo lineal. Una posibilidad muy utilizada en calibraciones de imágenes aéreas, como las utilizadas en este estudio, es relacionar empíricamente los valores que el sensor registra con datos obtenidos mediante radiometría de campo (calibración indirecta).

En cuanto a la radiometría de las imágenes, las únicas especificaciones suministradas por los proveedores son las que aparecen en SpecTerra Services (2007) donde se indica una corrección del brillo de las escenas con objeto de minimizar el efecto de reflectividad bidireccional (BRDF). Por tanto, se da por supuesto que la información de las imágenes son valores de nivel digital, correspondientes a la codificación de la radiancia que realiza el sensor cuando adquiere la imagen. No se dispone de información sobre coeficientes de calibración de la cámara.

Con el objetivo de predecir los valores de reflectividad de las imágenes, variable física comparable entre sensores, fechas, bandas, etc. se decidió probar a calibrar radiométricamente y obtener reflectividades en los vuelos de 10 de julio de 2012 para la imagen de maíz y 30 de julio de 2012 para la imagen de arroz, estableciendo una relación entre los valores digitales de la imagen y los valores obtenidos con medidas radiométricas en campo sobre diferentes superficies de control. Para ello, se siguió el mismo procedimiento usado por De Miguel et al (2001) para calibrar espectralmente imágenes adquiridas con un sensor aeroportado sobre la cuenca del río Guadiamar en España. Se seleccionaron una serie de superficies test (naturales y artificiales) sobre las que el día que se realizaba el vuelo se tomaban, lo más próximo posible a la hora de paso del vuelo, medidas radiométricas localizando su posición con GPS (aunque muchas de las superficies eran perfectamente reconocibles en la imagen). La idea es establecer a partir de estos datos un modelo de regresión o ecuación de calibración entre los

niveles digitales de la imagen (ND) y los valores de reflectividad medidos en campo sobre las superficies de control, para poder convertir los valores de nivel digital a reflectividad de las imágenes para cada una de las bandas.

A la hora de elegir las superficies de control se tuvo cuidado con que fueran lo suficientemente grandes y homogéneas a fin de evitar la mezcla espectral en un mismo píxel y poder tener medidas de reflectividad representativas.

4.2.1 Superficies de control sobre las que se realizan medidas radiométricas

Algunas de las superficies de control sobre las que se realizaron las medidas radiométricas fueron comunes a ambos ensayos, correspondiendo a superficies que se instalaban artificialmente en el campo (telas o mallas de diferentes colores y propiedades). Sin embargo, otras de estas superficies de control sobre las que se realizaron las medidas radiométricas fueron específicas de cada uno de los ensayos y correspondían a superficies naturales cercanas o dentro de ensayo como carreteras, suelos de distintos tipos, vegetación natural, etc. (Tabla 2).

Tabla 2: Superficies de cada ensayo sobre las que se realizaron medidas radiométricas en campo.

Superficies	Ensayo maíz 10/07/2012	Ensayo Arroz 30/07/2012	Observaciones
Teflón	x	x	Panel blanco de teflón, cuya reflectividad es aproximadamente de 10 y 18% menor que la de un Spectralon según la longitud de onda (Guillén et al, 2011).
Malla negra	x	x	Malla de rejilla negra
Tela negra	x	x	
Suelo desnudo	x	x	Muestras de suelo sin vegetación. Dos muestras en el ensayo de arroz y una en el ensayo de maíz.
Saco blanco	x		Saco de rejilla blanco, cuya reflectividad está por debajo del panel blanco de teflón.
Bandeja negra	x		Bandeja negra de plástico
Vegetación 1	x	x	En el caso del ensayo de arroz corresponde a cultivo alto y en el ensayo del maíz a la muestra 1 izquierda de la parcela 41 (P41_1i).
Vegetación 2	x	x	En el caso del ensayo de arroz corresponde a cultivo alto y en el ensayo de maíz a la muestra 1 izquierda de la parcela 24 (P24_1i).
Vegetación con suelo		x	
Carretera		x	
Costra de sal		x	Suelo dónde existe un afloramiento de sal
Mala hierba		x	
Sombra de cultivo	x		Sombra recogida en una esquina de la parcela dónde se encuentra el ensayo de maíz.

En las Figuras 11 y 12 se puede ver su posición en las imágenes:

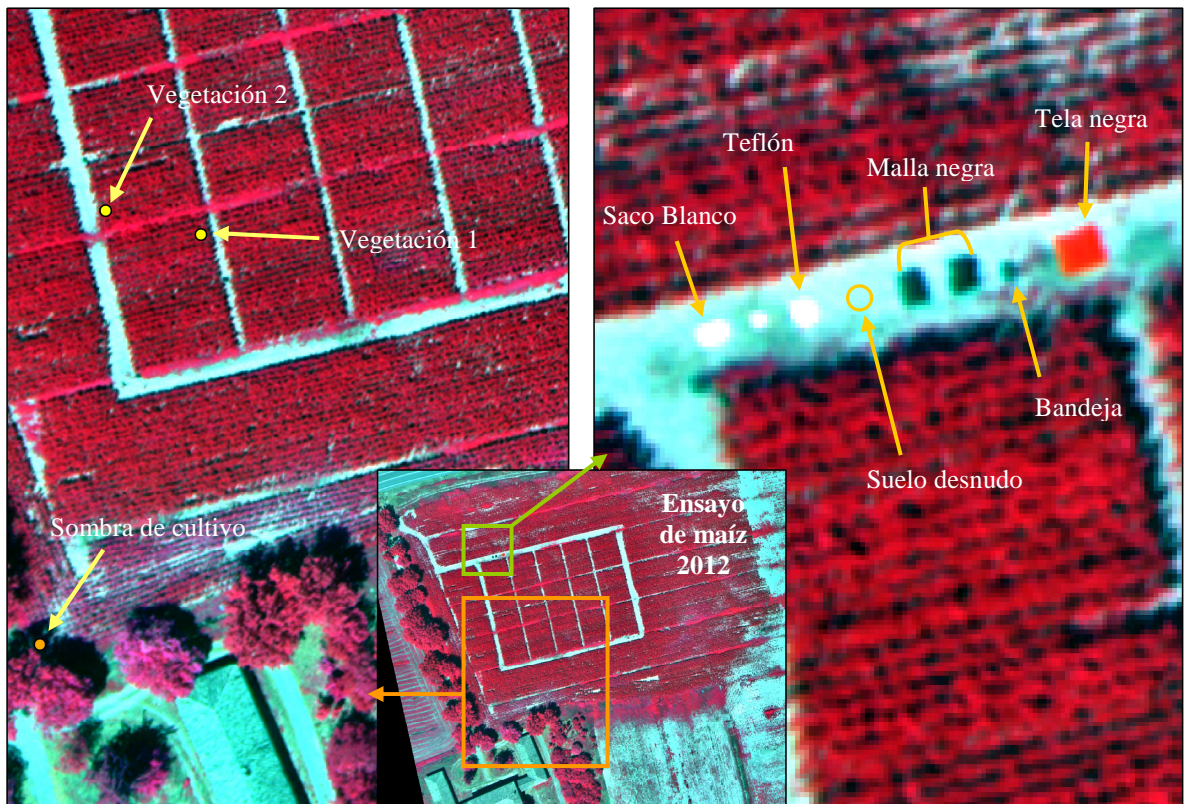


Figura 11: Imagen del ensayo de maíz de 2012 con la localización de las superficies de control.

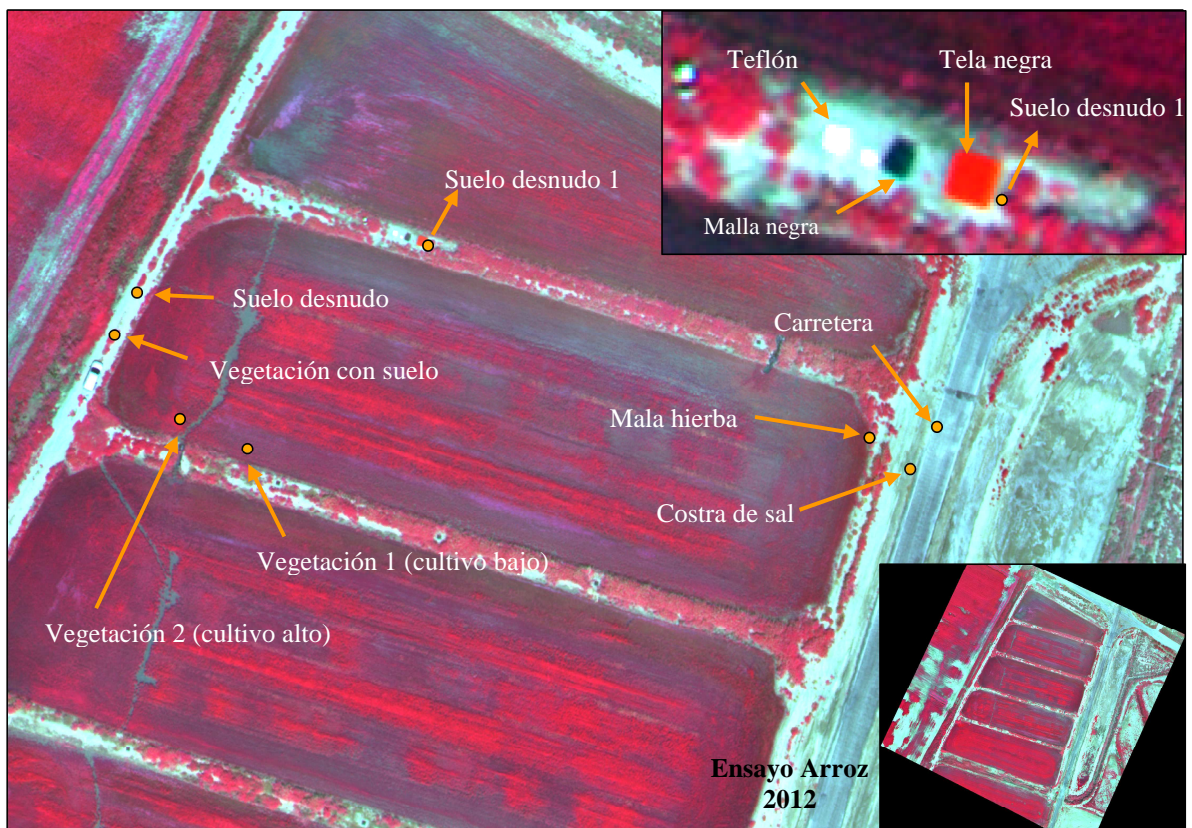


Figura 12: Imagen del ensayo de arroz de 2012 con la localización de las superficies de control

4.2.2 Procedimiento para la toma de medidas radiométricas en campo.

Las medidas radiométricas se realizaron con el espectroradiómetro portátil Ocean Optics HR2000 que cubre el rango 200-1100nm con 1nm de resolución óptica. En la Figura 13 se muestran los diferentes componentes del equipo de radiometría.

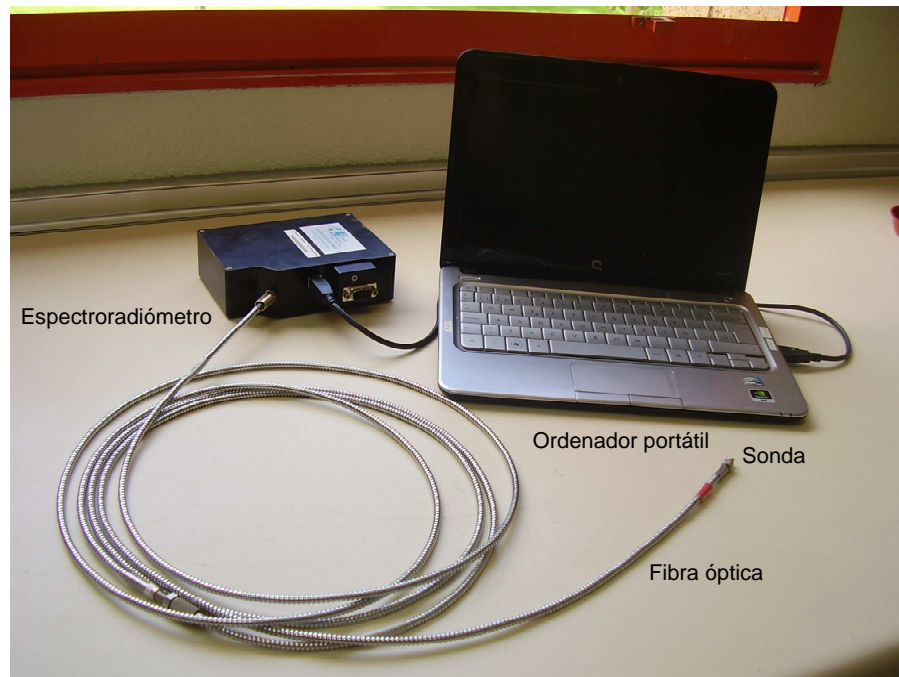


Figura 13: Componentes del equipo de radiometría utilizado en las medidas de campo

De todas las longitudes de onda que registra el radiómetro se seleccionaron las que se encuentran entre los 400 – 900 nm rango en las que se tiene seguridad de poder obtener medidas libres de ruido. Como panel de referencia se utilizó el Spectralon SRM-99 (Labsphere, Nort Sutton, NH, USA).

Las medidas de radiometría se realizaron bien justo antes del paso del avión o justo después, entorno al mediodía solar con un campo instantáneo de visión (IFOV) de 25° desde el nadir y manteniendo una distancia de unos 5cm con la superficie a medir.

Se siguieron los siguientes pasos:

a. Medida de la corriente oscura. Es la señal registrada por el receptor cuando no está expuesto a la fuente de iluminación. Hay que tener en cuenta que esta medida se puede ver afectada por la temperatura, por lo que hay que tener cuidado en el campo. La medida de corriente oscura se toma tapando totalmente la sonda para que lo único que se registre sea el ruido del aparato. Esta medida se sustraerá posteriormente de las medidas realizadas sobre las superficies de control (blanco de referencia y superficies elegidas como muestra) para obtener su reflectividad. Dicha medida se tomó justo antes de iniciar las medidas sobre las superficies de referencia y control.

b. Ajuste del tiempo de integración. Es el periodo de tiempo que el detector se encuentra expuesto a la luz entrante. Se debe de ajustar en función a las condiciones de iluminación. Para ello hay que buscar el valor más elevado posible para que la ratio señal ruido sea elevada pero sin llegar a problemas de saturación. El umbral de intensidad fue de 3500 unidades.

c. Adquisición de un espectro de referencia. Se captura utilizando un panel con reflectividad máxima y comportamiento lambertiano o perfectamente difusor. Hay que tener en cuenta que el panel de referencia cubre perfectamente el IFOV. Hay que tomar medidas del panel de referencia periódicamente, más aún si las condiciones lumínicas son cambiantes. En este caso se tomó una única medida sobre el panel de referencia después de la medida de la corriente oscura ya que el tiempo de medida sobre las superficies control fue muy corto (15 minutos).

d. Adquisición de los espectros de las superficies de control. Se tomaran en modo “Snapshot” (modo disparo), es decir registra en continuo integrándose varias lecturas en una sola medida, promedio de todas ellas.

e. Comprobación de los espectros de medida según se iban recogiendo para detectar posibles errores.

El programa utilizado para la captura de medidas fue OOiBase32. Se seleccionó cómo tipo de información a obtener Radiancia y el modo de captura elegido fue modo disparo. De esta manera para cada una de las muestras registradas se guardaban los siguientes archivos: Dark, con los datos de la corriente oscura; Reference con radiometría del panel de referencia; Sample, con la radiometría de las superficies control y Scope con la intensidad de la fuente de luz.

4.2.3 Post-procesamiento de las medidas radiométricas para la obtención de reflectividades

Las medidas registradas con el espectro-radiómetro se trataron con el programa SAMS versión 3.2 obteniéndose las reflectividades mediante la siguiente fórmula:

$$\%R_{\lambda} = \frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{R_{\lambda} - D_{\lambda}} * 100$$

Dónde:

- S_{λ} es la radiancia del punto de muestreo en la longitud λ .
- D_{λ} es la radiancia de la corriente oscura en la longitud λ .
- R_{λ} es la radiancia del panel de referencia en la longitud λ .

Los pasos seguidos para la obtención de la reflectividad son los siguientes:

1. Se importan las firmas (datos) desde el archivo dónde están almacenadas.
2. Se selecciona la firma que pertenece a la corriente oscura y se marca como referencia en el programa.
3. Se seleccionan los archivos .Sample y .Reference de cada una de las muestras que se quieren procesar.
4. Se aplica la herramienta *subtraction*, para restar la radiancia de la corriente oscura a cada una de las muestras (Sample) y a la radiancia del panel de referencia (Reference).
5. Se marca como referencia para el programa la radiancia de la superficie de referencia a la que ya se le ha restado la corriente oscura. Se seleccionan entonces las radiancias de las superficies de control a las que ya se ha restado la corriente oscura, y se realiza el ratio entre los controles y la referencia.
6. Una vez que se tiene el ratio calculado hay que escalar las firmas en función del panel de referencia usado, como en este caso se usó un Spectralon se escala al 100% de reflectividad.
7. Suavizado de la firma espectral mediante filtros. Es opcional. En este caso se utilizó el filtro de Savitzky-Golay, con un orden de polinomio de 2 y con una anchura de ventana de 25 (SG: 2-25-25).

Una vez realizados todos los pasos anteriores se dispuso de las firmas espectrales y valores de % de reflectividad de cada muestra tal y como se puede ver en las Figuras 14 y 15.

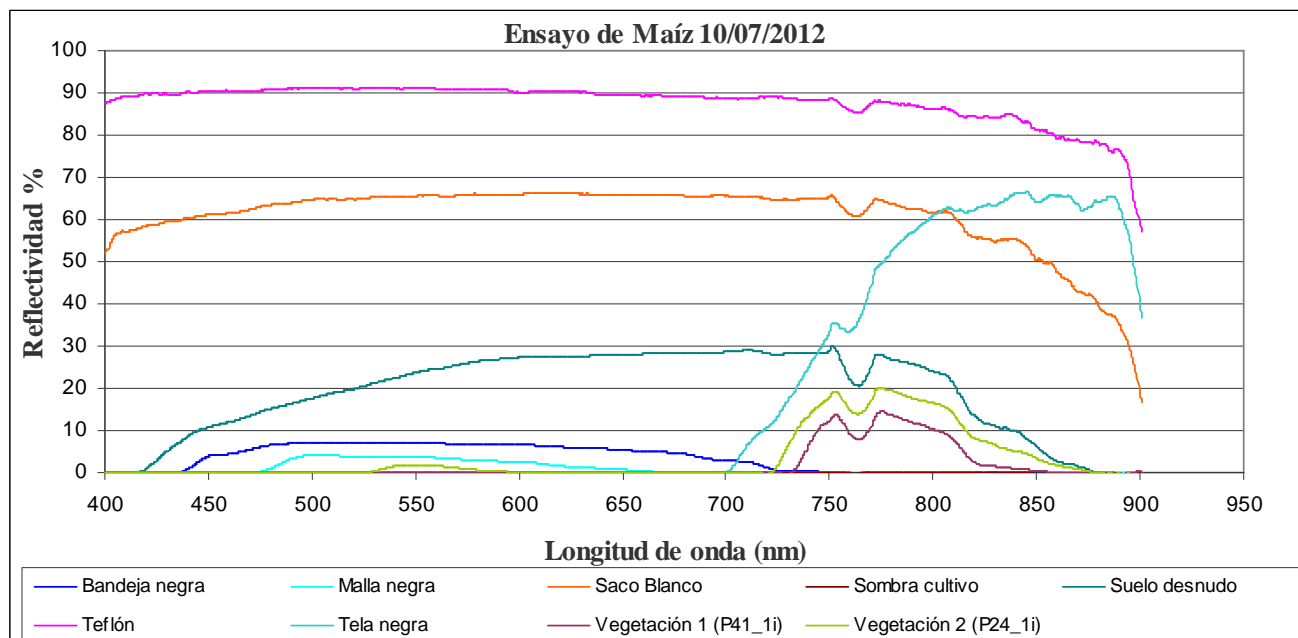


Figura 14: Signaturas espectrales de las diferentes superficies de control sobre las que se realizaron las mediciones radiométricas en el ensayo de maíz

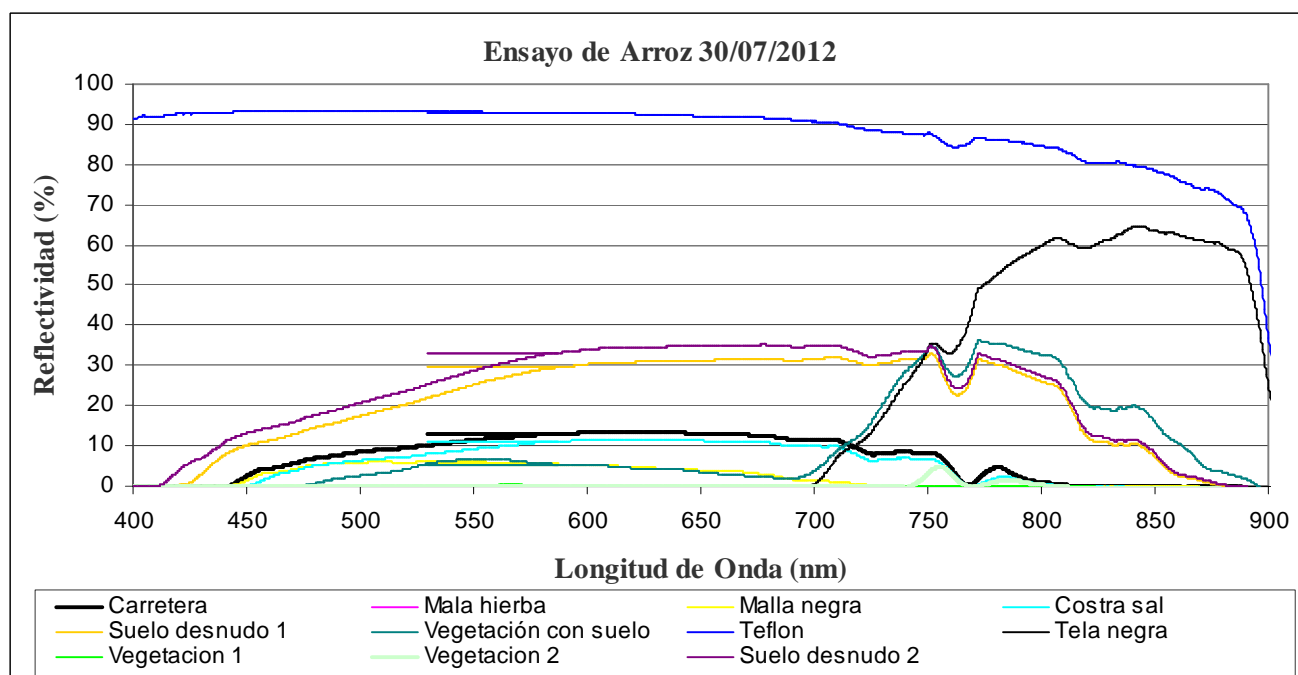


Figura 15: signaturas espectrales de las superficies de control sobre las que se realizaron las mediciones radiométricas en el ensayo de arroz

4.2.4 Extracción de la información necesaria para realizar la calibración

a) Medidas radiométricas

Para relacionar las medidas radiométricas obtenidas en campo con los niveles digitales de la imagen obtenida con la cámara aerotransportada, es necesario en primer lugar obtener los valores de reflectividad correspondientes a los 4 rangos de longitud de onda en los que realiza las medidas el sensor aerotransportado con el que se ha tomado la imagen. Por tanto, se extrajo de la signatura espectral correspondiente a cada una de las superficies de control la reflectividad promedio para las longitudes de onda entre 440 a 460nm correspondiente a la banda 1 (azul), 540-560nm correspondiente a la banda 2 (verde), 665-685nm correspondiente a la banda 3 (rojo) y 770-790nm que corresponde a la banda 4 (infrarrojo) de las imágenes (Tabla 3).

b) Imágenes

Para la extracción de los ND de las superficies de control en las imágenes, se localizaron en la imagen las superficies sobre las que se habían realizado las medidas radiométricas en campo. Sobre ellas se generó un área de interés (AOI) con el programa Erdas Imagine 9.1, a partir de la cual se extrajo el valor medio de ND para cada AOI (Tabla 3).

Tabla 3: Reflectividades obtenidas con radiometría y sus niveles digitales (ND) obtenidos de las imágenes con sensor aerotransportado en las diferentes superficies de control para cada una de las cuatro bandas analizadas de los ensayos de arroz y maíz.

	Banda 1 (Azul) 440-460nm		Banda 2 (Verde) 540-560nm		Banda 3 (Rojo) 665-685nm		Banda 4 (IRC) 770-790nm	
	Reflectividad %	ND imagen	Reflectividad %	ND imagen	Reflectividad %	ND imagen	Reflectividad %	ND imagen
Ensayo de arroz (30/07/2012)								
Carretera	2.43	4191.86	11.44	6810.71	12.52	5379.57	3.28	4412.86
Mala hierba	0.00	1720.64	0.00	3492.21	0.00	3080.07	0.00	4230.86
Suelo desnudo 1	9.91	3226.86	25.25	5543.71	31.62	4441.29	29.93	5293.00
Vegetación 2(cultivo alto)	0.00	1307.88	0.00	2582.38	0.00	1408.25	0.97	5358.75
Teflón	93.14	13585.50	93.08	13797.07	91.63	13622.21	86.11	10432.71
Malla negra	1.63	2981.57	6.00	3676.71	3.08	2609.29	0.00	2889.14
Vegetación 1 (cultivo bajo)	0.00	1552.07	0.06	3251.50	0.00	1942.07	0.00	4470.36
Costra de Sal	0.55	3356.50	9.20	5886.36	10.89	5122.71	1.53	4490.21
Suelo desnudo 2	13.03	5073.88	28.74	9240.38	35.08	7663.25	31.17	5914.38
Vegetación con suelo	0.00	1840.71	6.73	3598.14	2.36	2227.71	35.17	6369.43
Tela negra	0.00	1643.75	0.00	2069.75	0.00	2192.13	52.29	8225.25
Ensayo de maíz (10/07/2012)								
Tela negra	0.00	1354.54	0.00	1381.40	0.00	1432.80	52.22	8722.31
Bandeja negra	4.51	3139.75	8.05	3775.00	5.52	3398.50	0.00	3066.50
Malla negra	0.61	2454.27	1.90	2555.61	0.06	2291.63	0.00	2117.86
Teflón	90.37	13005.92	91.08	13172.67	89.26	12317.08	87.57	10881.17
Saco blanco	61.07	12918.67	65.57	13106.25	65.71	12133.33	63.65	9329.25
Suelo desnudo	10.68	5773.33	23.66	9261.08	28.31	7936.75	26.74	6460.67
Sombra de cultivo	0.00	996.25	0.00	1312.19	0.00	788.81	0.00	2141.69
Vegetación 1	0.00	968.17	0.02	1778.00	0.00	929.33	10.16	5943.33
Vegetación 2	0.00	1108.29	1.65	2132.00	0.00	984.57	16.13	6387.14

4.2.5 Determinación de los modelos de ajuste y resultados

Normalmente la relación entre las reflectividades medidas en campo en superficies control y los niveles digitales de las imágenes es lineal. Por ello, se han probado dos ajustes al modelo lineal $Y = a + bX$:

- Modelo A: Es un ajuste donde la variable dependiente (Y) es la reflectancia obtenida mediante radiometría de campo (R) y la variable independiente (X) es el nivel digital (ND) de la imagen, que en este caso se ha dividido por 10000: $R = a + b \cdot ND/10000$
- Modelo B: En el segundo modelo a variable dependiente (Y) es la reflectancia obtenida mediante radiometría de campo y la variable independiente es EXP (ND/10000): $R = a + b \cdot EXP(ND/10000)$. La división de los niveles digitales por 10000 se utiliza para ajustar la escala de los datos derivados de la imagen. La información de la imagen se recoge en formato de 14 bits con valores muy elevados. La división por 10000 reescala los valores digitales en el rango de 0-2 lo que permite una mejor visualización y un mejor ajuste de los modelos de regresión en particular el segundo modelo donde la variable independiente es una exponencial.

El análisis de regresión se ha realizado con el programa Statgraphplus plus 5.1. Los resultados para el ensayo de maíz se muestran en la Tabla 4 y Figura 16. Los correspondientes al arroz en la Tabla 4 y en la Figura 17.

Tabla 4: Ecuaciones de calibración: Valores estimados de los parámetros a y b de los dos modelos de regresión ajustados ($R = a + b \cdot ND/10000$ y $R = a + b \cdot EXP(ND/10000)$) con el coeficiente de determinación (R^2) y su significación, para cada una de las 4 bandas analizadas en los ensayos de arroz y maíz.

	Modelo A R=a+bND/10000				Modelo B R=a+b EXP(ND/10000)			
Ensayo maíz (n=9)								
	a	b	R2	Error	a	b	R2	Error
B1	-11.23	64.32	91.29***	10.53	-35.93	30.27	94.60***	8.29
B2	-12.87	63.5	89.22***	11.85	-36.34	29.76	93.64***	9.10
B3	-10.77	67.72	92.80***	9.69	-39.9	34.03	96.48***	6.77
B4	-29.52	94.86	88.84***	11.44	-70.37	51.28	95.02***	7.64
Ensayo Arroz (n=11)								
B1	-17.11	76.3	93.68***	7.31	-42.59	34.5	98.17***	3.93
B2	-23.44	73.12	86.67***	10.51	-44.28	33.02	93.87***	7.13
B3	-16.83	74.93	91.91***	8.33	-40.11	33.94	93.97***	7.19
B4	-50.22	127.71	90.01***	9.43	-92.51	63.65	90.07***	9.09

*** Significativo a un nivel de probabilidad $p < 0.001$

En ambos modelos y para todas las bandas, las relaciones obtenidas son estadísticamente significativas a un nivel de probabilidad $p < 0,001$. Los coeficientes de determinación (R^2) son altos, superiores para todas las bandas al 85% para el Modelo A, y al 90% para el B, lo que indica buenos ajustes. De Miguel et al. (2001) obtienen R^2 de similar magnitud. Los errores estándar de estimación oscilan entre 7 y 12 para el modelo A y entre 3 y 9.5 para el modelo B, siendo siempre más bajos en el caso de modelo B.

Aunque en el ensayo de arroz se intentó coger superficies control más variadas en cuanto a respuesta espectral que las seleccionadas en el ensayo de maíz, los ajustes son de bondad similar, si bien en su conjunto parecen ligeramente mejores que los obtenidos en el maíz.

Otro aspecto reseñable es que las imágenes se adquieren ajustadas a la superficie ocupada por los ensayos y algo de superficie agrícola adyacente. Ello limitó la posibilidad de encontrar superficies

control que presenten respuestas espectrales más variadas, y por tanto, el poder realizar el ajuste en todas las bandas con más puntos distribuidos a lo largo de todo el rango de reflectividades, y el poder disponer de superficies control no usadas en la calibración para validar la misma. Ello daría mayor validez a los ajustes realizados.

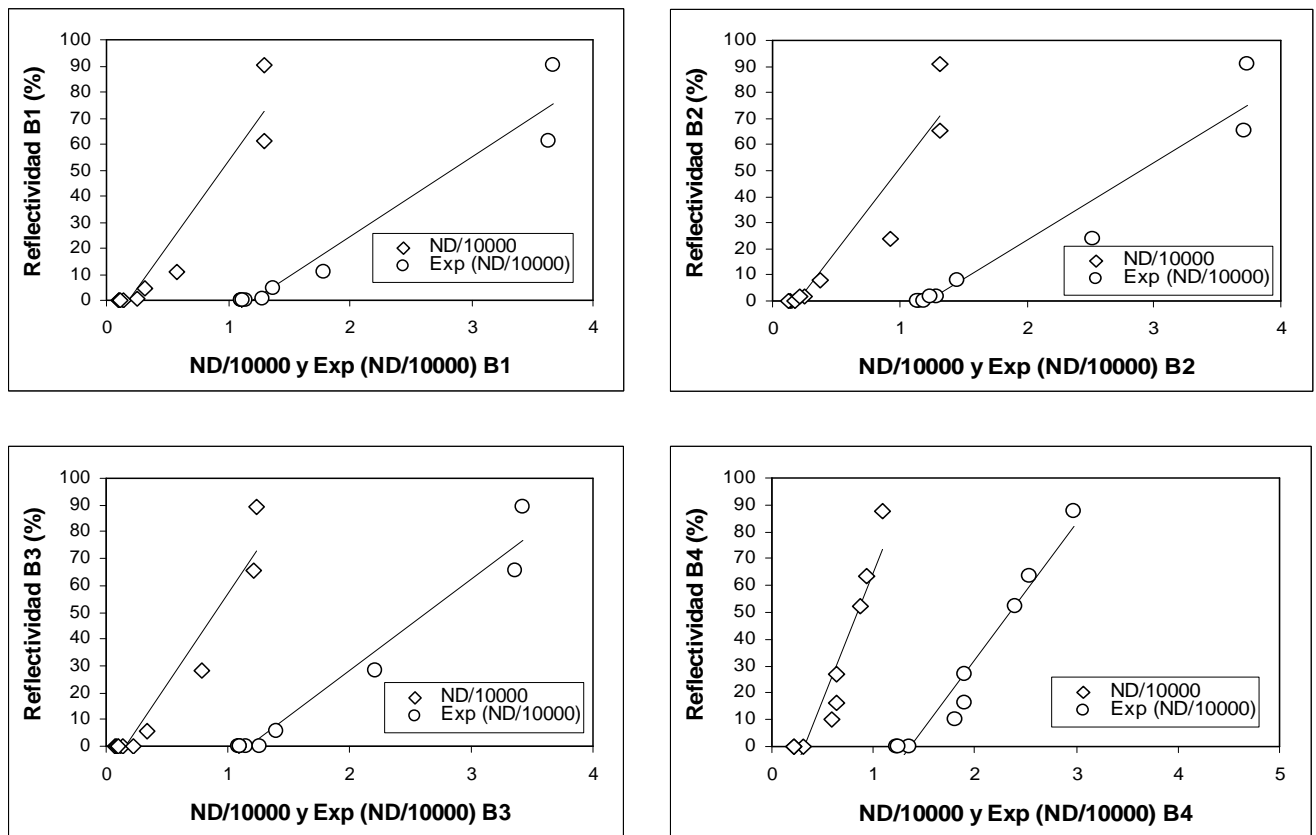


Figura 16: Relación entre la reflectividad y los niveles digitales (ND) dados por el sensor aerotransportado junto con los 2 modelos de regresión ajustados para las 4 bandas analizadas para el ensayo de maíz.

Las gráficas de los modelos de ajuste calculados para el ensayo del maíz (Figura 16), muestran como los datos se ajustan mejor cuando se usa el Modelo B $Y=a+b \text{ EXP } (ND/10000)$, este modelo permite una mayor amplitud en el eje de las X haciendo que los datos se ajusten mejor y que los valores del coeficiente de determinación (R^2) sean más altos. Este modelo B se ajusta mejor en cada una de las bandas que conforman la imagen del maíz.

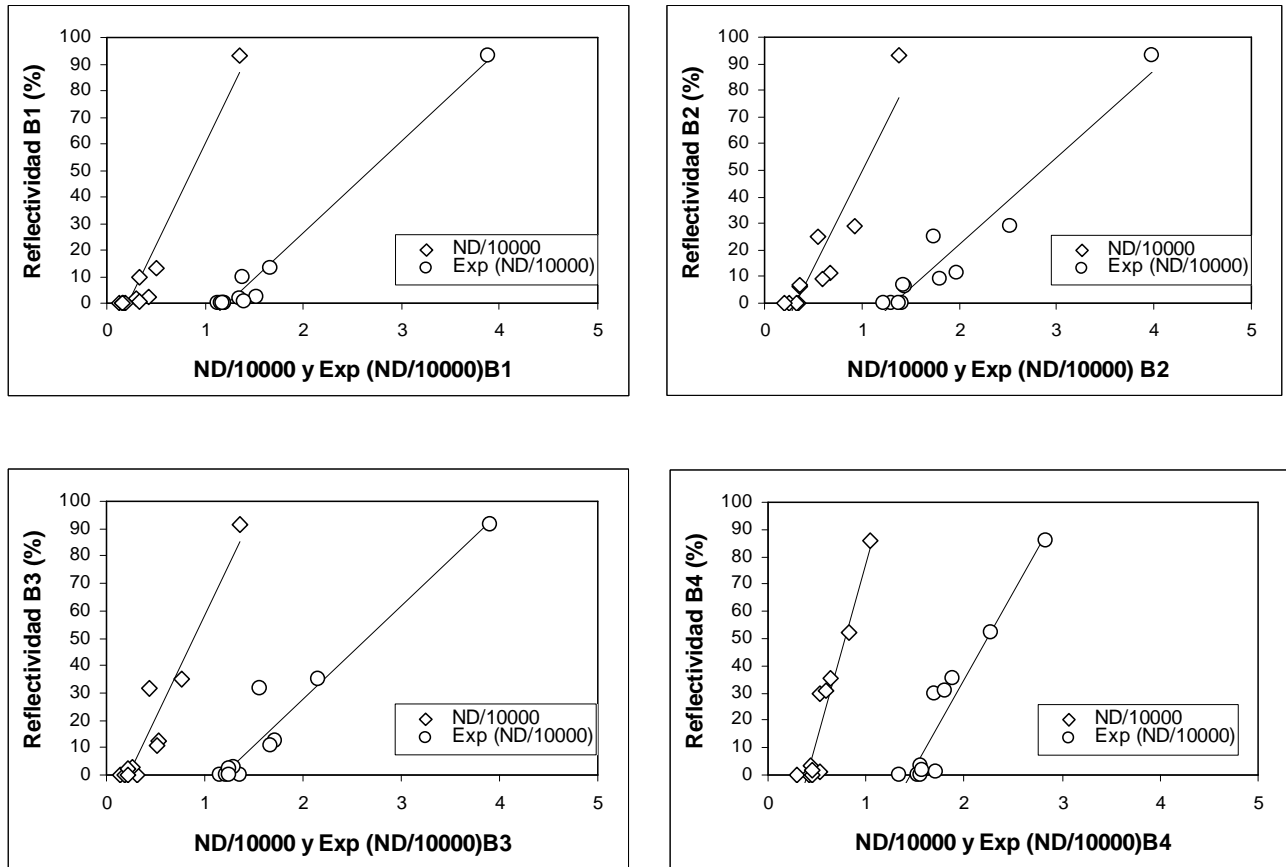


Figura 17: Relación entre la reflectividad y los niveles digitales (ND) dados por el sensor aerotransportado junto con los 2 modelos de regresión ajustados para las 4 bandas analizadas para el ensayo de arroz.

En el caso del ensayo del arroz (Figura 17), el ajuste de los datos también es mejor si le aplicamos el modelo B: $Y=a+b \text{ EXP (ND/10000)}$. Este modelo permite una mayor amplitud en el eje de las X haciendo que los datos se ajusten mejor y que los valores del coeficiente de determinación sean más altos. Este modelo exponencial (modelo B) se ajusta mejor en cada una de las bandas que conforman la imagen del arroz.

A la vista de los resultados obtenidos, se decidió adoptar el modelo B para la calibración radiométrica de las imágenes.

4.2.6 Medidas a tener en cuenta en estudios futuros

Del procedimiento anterior y los datos obtenidos, así como la observación de los resultados, podemos establecer una serie de recomendaciones para futuras calibraciones.

- Hacer una buena selección de las superficies de control de tal manera que se encuentren ampliamente distribuidas en las longitudes de onda que son de interés para el estudio, de esta manera se podrá conseguir mejorar el ajuste para las ecuaciones de calibración.
- Elegir un número de superficies control suficientes, de modo que se disponga de una serie de superficies para realizar la calibración y de otra serie distinta para realizar una validación que permita definir la calidad de la calibración.
- Asegurarse de que las superficies elegidas son homogéneas espectralmente y suficientemente amplias para no tener un espectro correspondiente a mezclas de superficies.

5. REPERCUSIÓN DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LAS IMÁGENES EN RELACIÓN AL TAMAÑO DE LA PARCELA EXPERIMENTAL.

Otro aspecto que se ha analizado en este trabajo es el efecto que tiene el tamaño de píxel de la imagen aerotransportada en la información recogida en la imagen. Así en esta parte el trabajo se han creado imágenes con diferentes tamaños de píxel a partir de la imagen original y se ha analizado hasta que punto con el aumento del tamaño de píxel, es decir la reducción de la resolución espacial, los datos de interés para el estudio derivados de las imágenes son coherentes y no varían en exceso. Si es así se podrían contratar en el futuro vuelos que capturen la imagen a una menor resolución espacial disminuyendo así el coste y no interfiriendo en la validez de los datos que a posteriori se obtengan de la imagen, siempre y cuando los resultados de este estudio sean satisfactorios. En una segunda fase sería además necesario analizar como la información extraída de las imágenes con distinta resolución espacial se relaciona con datos biofísicos de los cultivos tomados en campo.

Este trabajo se realizó con la imagen del ensayo de maíz de Almodóvar tomada el 10 de julio de 2012. Concretamente se compararon los niveles digitales medios de las bandas verde (B2), rojo (B3) e infrarrojo cercano (B4) obtenidos para cada una de las parcelas del ensayo de campo, partiendo de imágenes con distinta resolución espacial. Las bandas elegidas representan el contraste espectral que tiene la vegetación vigorosa. En la banda verde se produce un pico de reflectividad de la cubierta vegetal, al ser de toda la región visible del espectro electromagnético donde menor es el efecto absorbente de la vegetación. Por otro lado, es en el infrarrojo cercano donde la reflectividad de la vegetación vigorosa es más elevada y en el rojo donde se produce una elevada absorción y una baja reflectividad. Además estas bandas son las que se utilizan para determinar dos índices de vegetación de interés en la detección de deficiencias de nitrógeno en cereales: el GNDVI basado en la diferencia entre los valores en la banda del verde y la infrarroja y el NDVI basado en la diferencia entre el rojo y el infrarrojo. Por ello, en la comparación de la información recogida a los distintos tamaños de píxel también se han incluido los índices GNDVI y NDVI. La definición de estos índices y una información mas detallada de los mismos puede encontrarse en el Apartado 7.1.

5.1 Obtención de capas ráster a diferentes tamaños de píxel

A partir de la imagen del ensayo del maíz correspondiente al vuelo del 10 de julio de 2012 con un tamaño de píxel de 0.15m x 0.15m se obtuvieron imágenes con diferentes tamaños de píxel. Este proceso se realizó con ArcGIS 10. Los pasos seguidos fueron:

- Elección del tamaño de píxel: se eligieron tamaños de píxel de: 0.30 x 0.30 m, 0.60m x 0.60m, 0.90m x 0.90m, 1.20 m x 1.20m, 1.80m x 1.80m y 3.60m x 3.60m para tener una variación progresiva y de forma que el nuevo píxel estuviera formado por un numero entero de agrupaciones de píxeles de 0.15m×0.15m, tal y como se muestra en la Figura 18.
- Cálculo de un "lienzo"(extent) común para las nuevas capas ráster a generar: es muy importante tener en cuenta la extensión de la imagen, ya que lo que se pretende es que las imágenes nuevas no se generen con píxeles incompletos. La extensión original de la imagen en coordenadas UTM es:

	Superior: 4656353.8	
Izquierda: 699686.1		Derecha: 700025.1
	Inferior: 4656016.2	

Para realizar ello se buscó el mínimo común múltiplo de los diferentes tamaños de píxel a los que se quería recalcular la imagen. Una vez realizado el proceso la nueva extensión de la imagen ha sido:

	Superior: 4656351.0	
Izquierda: 699686.1		Derecha: 700024.5
	Inferior: 4656016.2	

- Generar capas ráster con nuevos tamaños de píxel. Este paso no se puede hacer de forma conjunta para todas las bandas de la imagen, sino que es necesario realizarlo individualmente para cada una de ellas. Mediante la función de Spatial Analyst/Generalization/Aggregate se generan las capas de salida con diferentes tamaños de píxel para cada una de las bandas. Como técnica de agregación de esta función (asignación del ND al nuevo píxel) se utiliza la media, de esta manera se asignará el valor medio de los píxeles que se han unido para formar los píxeles de la nueva imagen. Es importante indicar en la función el nuevo “lienzo”.
- Comprobación de la correcta asignación de los píxeles. Para asegurar que la imagen generada encaja perfectamente con la imagen original se han superpuesto las dos imágenes y se le ha asignado transparencia a la de menor resolución, comprobándose que el número de píxeles agregados es el correcto y que los límites de los píxeles coinciden.
- Obtención de los índices NDVI y GNDVI para cada una de las 5 nuevas resoluciones (ver Apartado 7.1).

Así al final se dispuso para cada una de las 4 bandas de la imagen y para los índices NDVI y GNDVI de 6 imágenes con distintas resoluciones, la original con resolución 0,15 m x 0,15 m y 5 imágenes adicionales con resoluciones de 0,3 m, 0,6m, 0,9m, 1,8 m y 3,6 m.

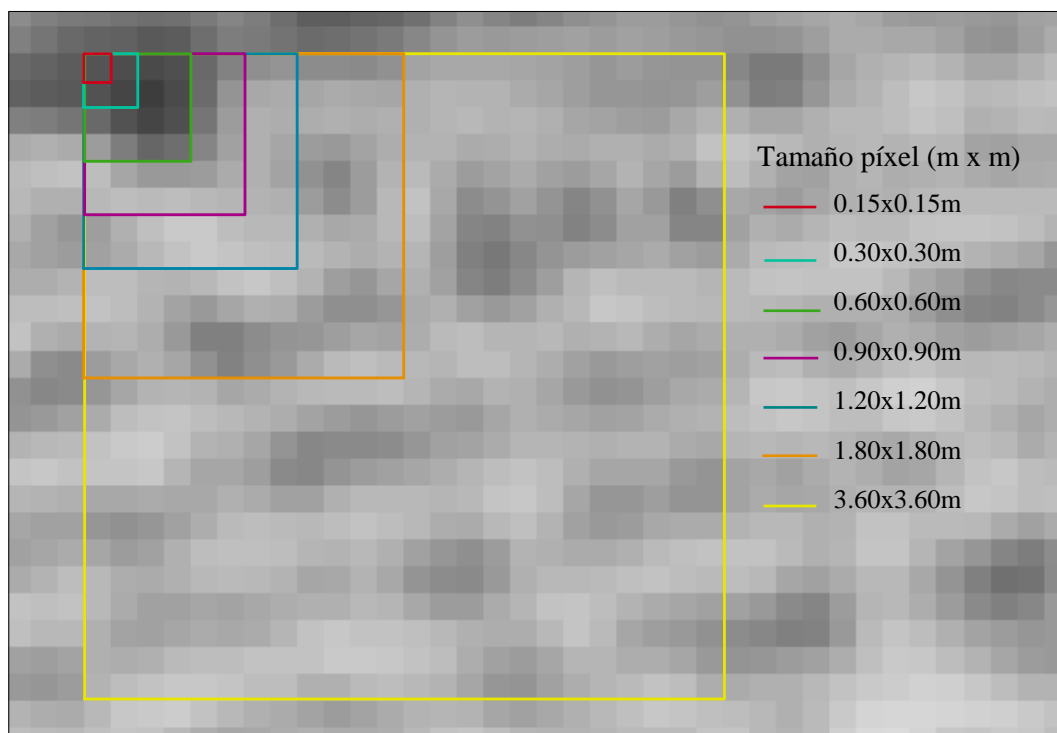


Figura 18: Representación de las agrupaciones de los píxeles para generar las imágenes con diferentes resoluciones espaciales.

5.2 Extracción para cada parcela de los niveles digitales medios de cada banda e índices.

Los muestreos de campo en el ensayo de maíz se realizaban en las dos filas centrales de cada una de las parcelas experimentales, tal y como se detalla en el apartado 6. Esto se hace así para eliminar el efecto borde en las mismas, es decir, la influencia que puedan tener sobre las líneas de cultivo más externas de cada una de las parcelas las parcelas y superficies colindantes. Por ello, la extracción de información de las imágenes correspondiente a cada una de las parcelas del ensayo se ha realizado también para esas dos filas centrales, eliminándose además el efecto de los píxeles de los bordes de estas dos líneas. Para ello, mediante la función Buffer de ArcGIS se generó una capa vectorial con una máscara de cada una de las 60 parcelas experimentales que incluía las dos filas centrales de cada parcela donde se realizaban los muestreos biofísicos. El buffer aplicado fue de 1.4m hacia el interior desde las líneas de borde de cada una de las parcelas experimentales, obteniéndose las máscaras que se pueden observar en la Figura 19.

Para cada una de las 6 imágenes, con distinta resolución, obtenidas en el paso anterior se extrajo la información correspondiente a la máscara de cada una de las 60 parcelas experimentales para las bandas B2, B3, B4, y los índices NDVI y GNDVI. En la Figura 20 se muestra un esquema del procedimiento seguido.

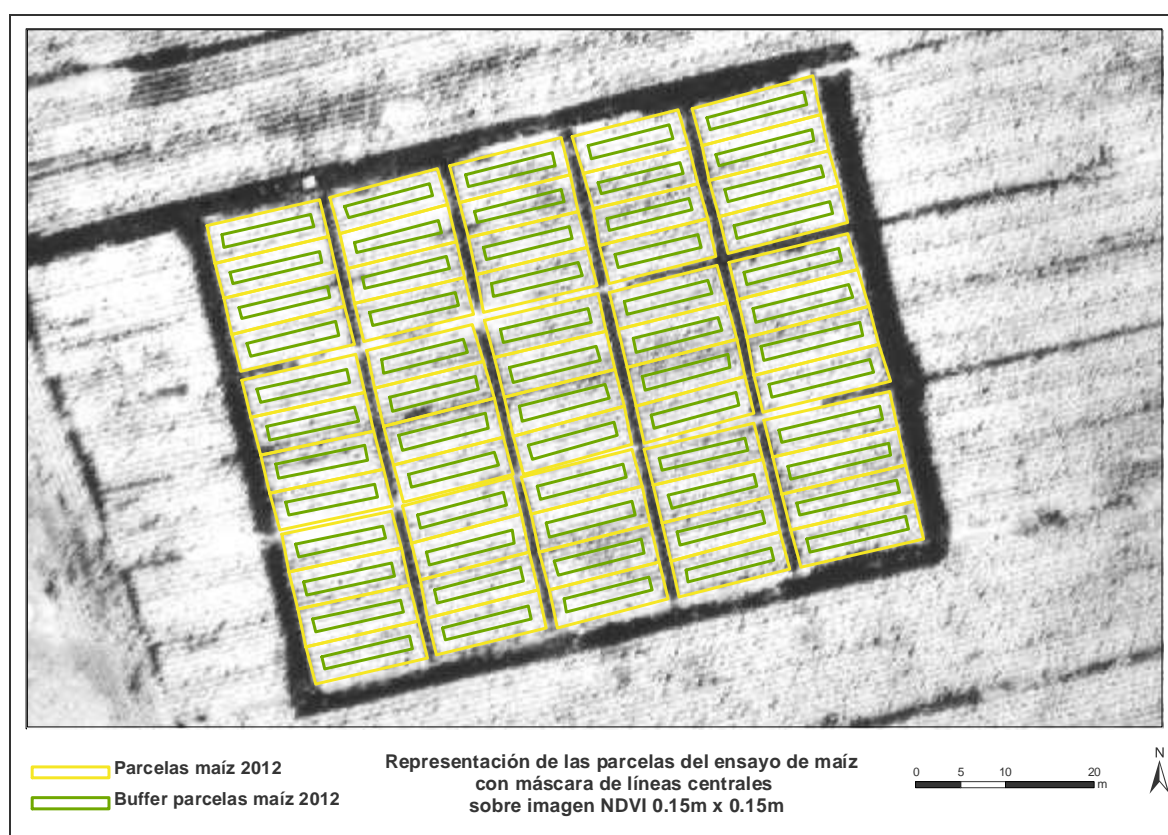


Figura 19: Parcelas del ensayo de maíz (naranja) con las máscaras obtenidas para cada una de ellas(verde) sobre la imagen de NDVI para el tamaño de píxel 0.30m x 0.30m.

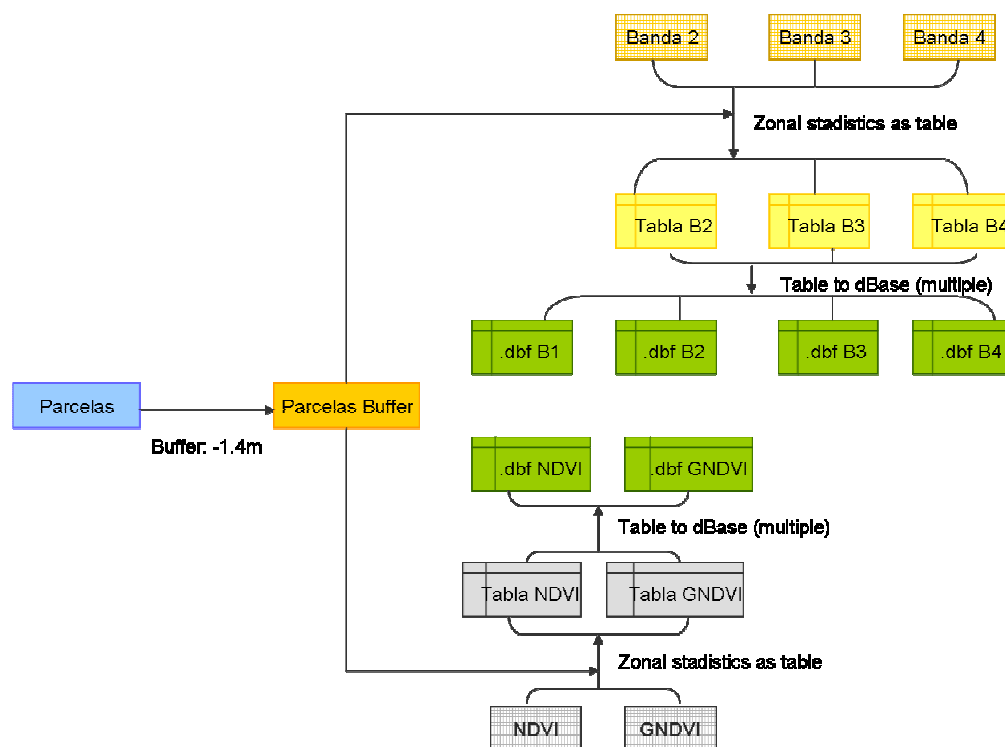


Figura 20. Esquema del procedimiento seguido para la extracción de la información estadística de las imágenes en cada una de las parcelas experimentales.

5.3 Análisis de la información estadística. Valoración del efecto de la resolución de la imagen sobre la información obtenida.

El número de píxeles sobre los que se había extraído la información estadística de cada parcela varía según la resolución de la imagen (Tabla 6).

Tabla 6: Estadísticos del número de píxeles utilizados para extraer información de cada parcela experimental para las distintas resoluciones espaciales de la imagen y relación (ratio) entre el número de píxeles a una resolución y la siguiente.

Resolución m x m	Número de píxeles				
	Mínimo	Máximo	Mediana	Media	Ratio
0,15	548	774	658	663	3,99
0,30	137	194	165	166	3,95
0,60	34	49	41	42	2,33
0,90	14	23	18	18	1,80
1,20	8	13	10	10	2,00
1,80	3	7	5	5	
3,60	1	2	1	1	

Se puede observar que como era de esperar que el número de píxeles en la máscara dibujada sobre las parcelas experimentales aumenta según disminuye el tamaño del píxel. Un mayor número de píxeles puede dar lugar a una mayor variabilidad en los datos siempre y cuando la superficie de estudio sea heterogénea, lo cual también supondría que en imágenes con tamaño de píxel mayor al reducirse el número de píxeles podría perderse información. Si bien, en caso de que las superficies contengan información homogénea se puede asumir un menor número de píxeles sin que se vea afectada la validez de los datos.

Por otro lado, dado que para pasar de una imagen de resolución X (por ejemplo 0.15m x 0.15m) a una imagen de resolución 2X (0.3m x 0.3m) se unen 4 píxeles en un único píxel, la relación (ratio) entre el número de píxeles utilizados para extraer información de dos imágenes de resolución consecutiva debería ser cercana a 4. En la Tabla 6 puede observarse que el ratio es muy próximo a 4 cuando se pasa de resolución 0.15m a 0.30m y de 0.30m a 0.60m pero disminuye hasta 2.3 al pasar de 0.6 m a 0.9 m. Esto estaría indicando que a partir de una resolución de 0.90m x 0.90m existe un número importante de píxeles cuyos límites sobrepasan la zona delimitada (máscara de las parcelas) y por lo tanto aportan información ajena a la de la zona de estudio. Luego para este estudio, imágenes de una resolución espacial inferior a 0.6 m x 0.60 m estarían introduciendo mucha información ajena a la zona de estudio y por lo tanto un error importante. Hay que resaltar que este resultado es dependiente del tamaño y la forma de la máscara utilizada.

Para establecer la relación entre la información obtenida a las distintas resoluciones espaciales se ha realizado un análisis de correlación entre los valores medios de ND de las bandas B2, B3, B4 y los índices NDVI y GNDVI a las distintas resoluciones. En este análisis de correlación, la comparación se ha hecho en todos los casos con respecto a la información obtenida de la imagen inicial de partida (0.15m x 0.15m). Los coeficientes de correlación obtenidos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Coeficientes de correlación entre los niveles digitales medios de las parcelas de estudio obtenidos de las imágenes a las distintas resoluciones.

Coeficiente de correlación			
Banda Verde		NDVI	
Imagen 0.15- Imagen 0.30	0.999 ***	Imagen 0.15- Imagen 0.30	0.999***
Imagen 0.15- Imagen 0.60	0.996***	Imagen 0.15- Imagen 0.60	0.995***
Imagen 0.15- Imagen 0.90	0.996***	Imagen 0.15- Imagen 0.90	0.992***
Imagen 0.15- Imagen 1.20	0.988***	Imagen 0.15- Imagen 1.20	0.983***
Imagen 0.15- Imagen 1.80	0.955***	Imagen 0.15- Imagen 1.80	0.946***
Imagen 0.15- Imagen 3.60	0.748***	Imagen 0.15- Imagen 3.60	0.677***
Banda Roja		GNDVI	
Imagen 0.15- Imagen 0.30	0.999***	Imagen 0.15- Imagen 0.30	0.999***
Imagen 0.15- Imagen 0.60	0.996***	Imagen 0.15- Imagen 0.60	0.996***
Imagen 0.15- Imagen 0.90	0.995***	Imagen 0.15- Imagen 0.90	0.994***
Imagen 0.15- Imagen 1.20	0.988***	Imagen 0.15- Imagen 1.20	0.986***
Imagen 0.15- Imagen 1.80	0.941***	Imagen 0.15- Imagen 1.80	0.960***
Imagen 0.15- Imagen 3.60	0.670***	Imagen 0.15- Imagen 3.60	0.720***
Banda IRC			
Imagen 0.15- Imagen 0.30	0.997***		
Imagen 0.15- Imagen 0.60	0.988***		
Imagen 0.15- Imagen 0.90	0.983***		
Imagen 0.15- Imagen 1.20	0.965***		
Imagen 0.15- Imagen 1.80	0.920***		
Imagen 0.15- Imagen 3.60	0.730***		

*** Significativo a un nivel de probabilidad $p < 0.001$

Se ve que existe una alta correlación entre la información obtenida de la imagen original y las imágenes de distinto tamaño de píxel hasta llegar a 1.80m, con coeficientes de correlación muy significativos y superiores a 0.92. A partir de una resolución de 3.60m esta relación disminuye drásticamente.

A pesar de que se ha visto que a partir de un tamaño de píxel de 0.6 m x 0.60m se captaba una parte importante de información de fuera de la máscara esta información no es muy diferente de la interior a la máscara siempre que el tamaño de píxel no sobrepase los 1.80m.

En la Figura 21 se puede observar cómo se dispersan los puntos en la imagen de tamaño de píxel 3.60m x 3.60m y 0.60m x 0.60m con respecto a la imagen original de tamaño de píxel 0.15m x 0.15m, para la banda 4 y GNDVI. Los valores de la imagen de 3.60m aparecen más dispersos que los de 0.60 en ambas gráficas.

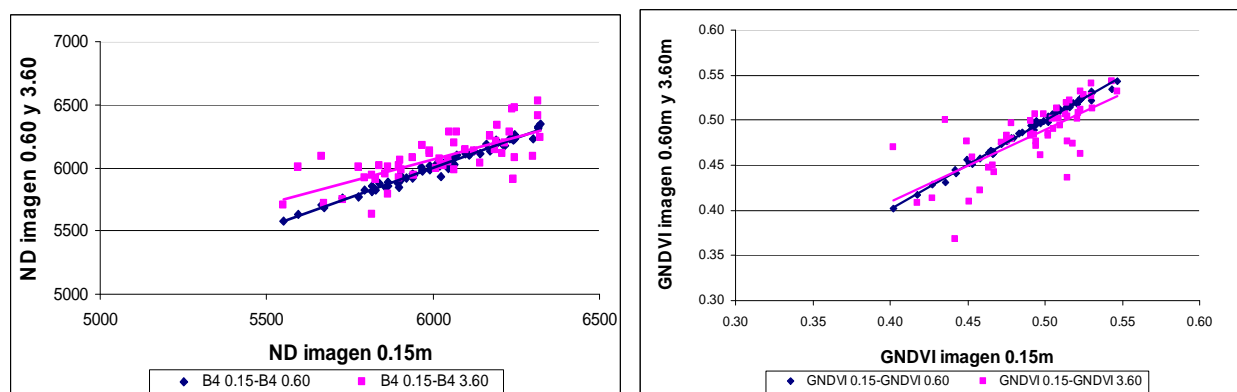


Figura 21: Gráficas que muestran la dispersión de los datos de las imágenes de 3.60x3.60m y 0.60 x 0.60 respecto a la imagen original de 0.15m x 0.15, para la B4 y GNDVI.

Otra información que es interesante de observar es como disminuye la variabilidad en la información obtenida la aumentar el tamaño del píxel. Esta información se presenta en la Tabla 8.

Se puede observar que la desviación es mayor en la imagen original, es decir en la imagen con tamaño de píxel 0.15m, lo cual está indicando que la variabilidad es mayor. Este valor de desviación típica o estándar va disminuyendo progresivamente a medida que se va aumentando el tamaño de píxel, por lo que la variabilidad de la información contenida se va haciendo menor, es decir se va perdiendo información al aumentar el tamaño de píxel y agregar la información. A partir del tamaño de píxel de 1.20m se observa un mayor decrecimiento del valor de la desviación pero dónde se produce un descenso más brusco es cuando el tamaño de píxel es de 3.6m. Aquí la variabilidad es muy pequeña ya que con este tamaño de píxel las parcelas que conforman en el ensayo pueden englobarse en uno o dos píxeles haciendo que no haya casi variabilidad de información dentro de la misma.

Tabla 8: Media de los valores de la desviación típica de los distintos índices (NDVI, GNDVI) y bandas (B2, B3, B4) obtenidos en las distintas parcelas a partir de imágenes con distintas resoluciones espaciales (tamaño píxel).

Tamaño píxel	Valores de la media de la desviación típica de las parcelas				
	NDVI	GNDVI	B2 (VERDE)	B3 (ROJO)	B4 (IRC)
0.15	0.062	0.056	322.341	230.196	703.392
0.30	0.055	0.048	272.270	202.295	598.273
0.60	0.040	0.036	197.389	156.113	377.164
0.90	0.033	0.029	151.346	124.211	283.130
1.20	0.031	0.027	130.682	112.530	237.734
1.80	0.023	0.021	101.367	83.714	178.536
3.60	0.005	0.004	29.648	20.971	34.037

Los valores de la desviación típica muestran el grado de dispersión de los valores de una muestra respecto al promedio de la misma.

Para una mejor visualización en la Figura 22 se presenta el valor de la desviación estándar para las bandas verde, roja y infrarroja. Se observa como el descenso más acusado se produce en el paso al tamaño de píxel de 3.60m y en el caso de la banda del infrarrojo cercano también hay un descenso de los valores de desviación en el paso del tamaño de 0.30 a 0.60m.

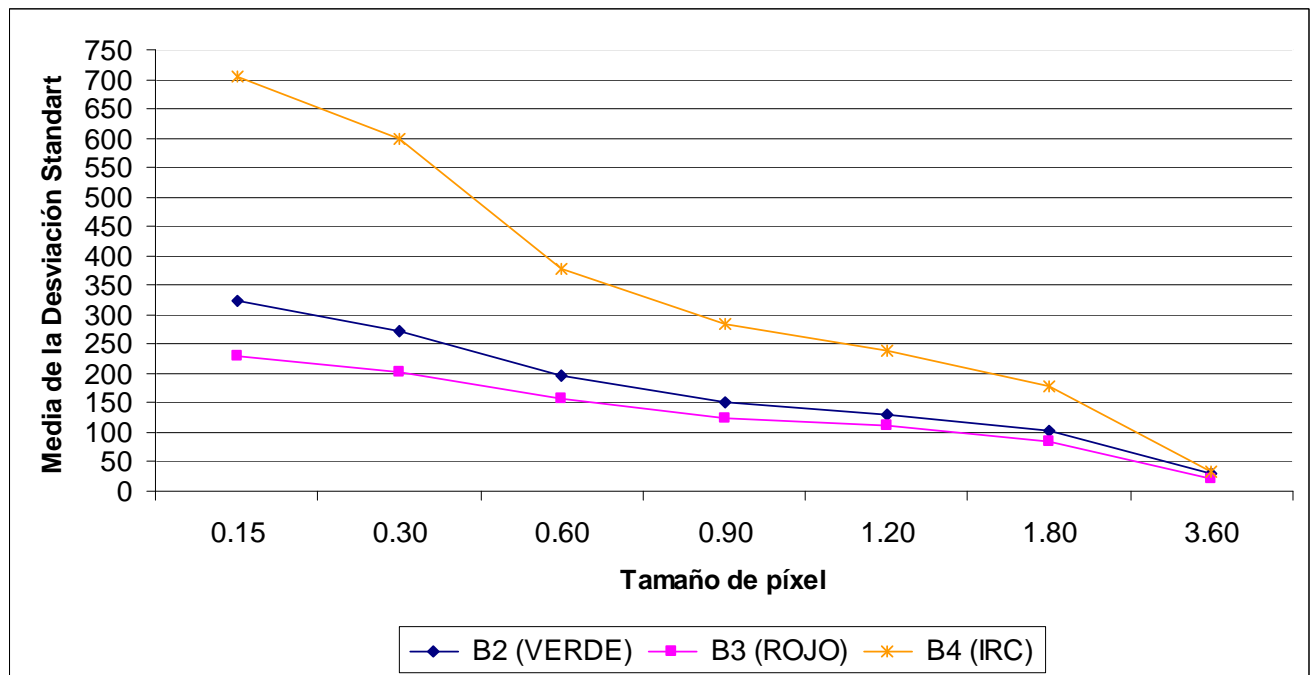


Figura 22: Representación de la media de la desviación típica de las bandas verde, rojo e infrarrojo cercano.

En resumen se puede decir que con el tamaño y forma de las mascararas utilizadas en este trabajo es posible reducir el tamaño de píxel de 0.15m hasta 0.60m sin incluir información ajena a la zona de estudio.

Además dadas las características del ensayo analizado es además posible disminuir la resolución de la imagen hasta 1.8m sin alterar substancialmente la información obtenida en las parcelas experimentales.

6. ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN RADIOMÉTRICA EN EL ENSAYO DE MAÍZ

En 2010, dentro del proyecto “Estrategias agronómicas para optimizar el uso del nitrógeno en maíz en sistemas de riego por aspersión” en el que se enmarca parte del presente estudio, se evaluó la información derivada de imágenes del mismo vuelo comercial que el utilizado en este trabajo para diagnosticar el estado nutricional del maíz en fases intermedias del cultivo (Isla et al, 2011). Dentro del proyecto se tiene previsto ampliar este trabajo con imágenes correspondientes a los ensayos realizados en 2011 y 2012. En 2012 se ha decidido apoyar y completar estos trabajos con radiometría de campo. Se busca tener caracterizados espectralmente diferentes estados nutricionales del maíz. Esta información servirá para validar la información derivada de las imágenes así como para ver la posibilidad de establecer modelos o relaciones empíricas entre contenido en clorofila de la planta y reflectividad.

6.1 Puesta a punto del equipo de muestreo

La toma de medidas radiométricas en el ensayo de maíz requería del diseño previo de un sistema que permitiese elevar la sonda por encima del cultivo, teniendo en cuenta que este puede superar los 2.5 metros de altura. Para ello se adaptó a una pértiga dos tubos de aluminio ensamblados sobre los cuales se sujetaba la fibra óptica del radiómetro con la sonda en su extremo (Figura 23). La pértiga es extensible lo cual permite variar la altura.

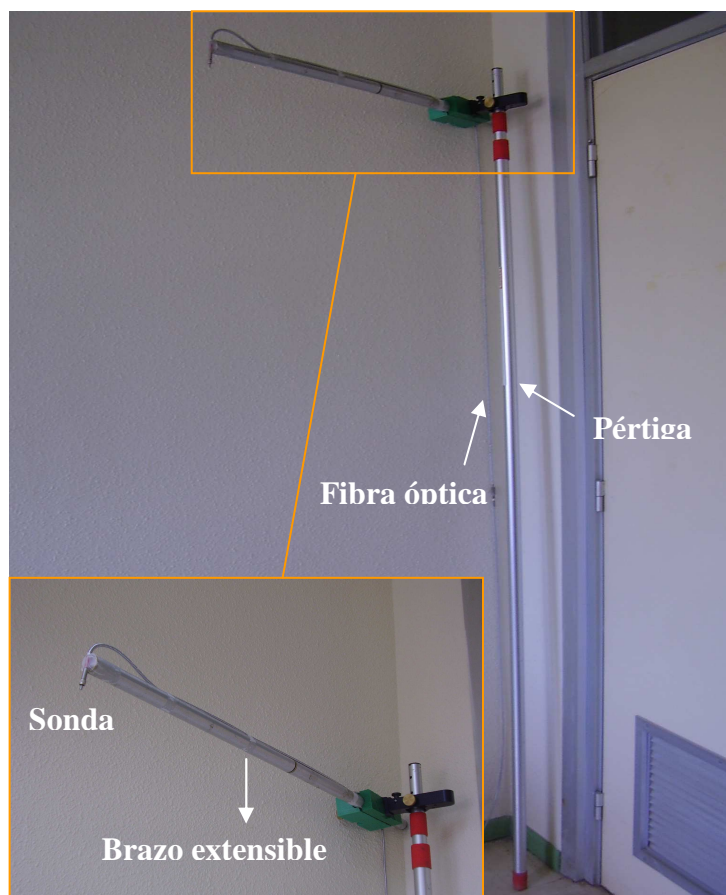


Figura 23: Soporte para la toma de medidas radiométricas

La sonda se fija al extremo del brazo extensible y el resto de la fibra óptica se sujeta por el brazo extensible siguiendo su recorrido.

El espectroradiómetro al que va unido la sonda se transporta dentro de una mochila para hacer más cómodo el muestreo y al mismo tiempo se protege del calor y de la humedad que hay en el ensayo en las horas centrales del día, cuando se toman las medidas.

El resto del equipo (ordenador portátil) se transporta en la mano. Las medidas las realizaron dos personas, una de ellas portaba la pértiga situándose detrás de la misma, y la otra persona que portaba el ordenador y el radiómetro se colocaba detrás de la persona que llevaba la pértica permitiendo así el libre movimiento de ambas personas y evitando a su vez que alguna de ellas pudiese interferir en las medidas.

6.2 Diseño del muestreo radiométrico

Cómo ya se ha descrito en la organización de ensayo en el Apartado 3.1 (Figura 2), cada parcela del ensayo contiene 6 filas de maíz, con plantas cada 15cm.

Los resultados de un ensayo similar realizado el año anterior mostraron que en condiciones de alto N inicial en el suelo (Escenario Alto) no se observan diferencias significativas en el rendimiento entre el tratamiento sin fertilizar y el resto de los tratamientos (Isla et al, 2011). A la vista de estos resultados se decidió realizar las medidas radiométricas únicamente en los escenarios medio y bajo.

Para evitar influencias de parcelas colindantes y tratar de recoger las muestras representativas se optó por realizar las medidas en las dos filas centrales de cada una de las parcelas. En la parcela 23 la medición se desplazó dos filas a la derecha al no ser representativas las dos filas centrales. En ellas el maíz no tenía un buen desarrollo a causa de un fallo mecánico cuando se aplicó el herbicida.

Se hicieron varias pruebas hasta encontrar un método de muestreo válido, rápido y eficiente. Inicialmente se ensayó a tomar medidas cada 8 plantas, caminando entre las líneas centrales de la parcela de estudio (línea 3ª y 4ª). Se tomaban primero lecturas radiométricas en la fila de la derecha y luego se volvía en sentido contrario tomando medidas en la otra fila (Figura 24). De este modo salían unas 16 muestras por parcela necesitándose un tiempo medio de aproximadamente 15 minutos por parcela, y más de 10 horas para muestrear las 40 parcelas elegidas, resultando inviable.

Cómo lo que se quería era poder tomar las medidas de radiometría lo más cercanas en tiempo al mediodía solar y al día de vuelo de captura de la imagen, se optó por otro tipo de muestreo más rápido pero igual de efectivo. En este otro muestreo se caminaba entre las dos líneas de maíz y se iban alternando las medidas a izquierda y derecha, configurando un esquema en zig-zag tal y como se muestra en la Figura 25. Así el número de muestras por parcela se reducía a la mitad, unas 8, y el tiempo de muestreo se reducía también considerablemente; en este caso se tardaba unos 5 minutos por parcela, lo que hacía viable tomar todas las medidas el mismo día del vuelo. De esta manera más simplificada el proceso llevaba aproximadamente unas 4 horas contando la toma de corriente oscura y del blanco de referencia. El itinerario seguido para la toma de las medidas radiométricas los dos días de muestreo aparece representado en la Figura 26.

En la Figura 27 se muestra una imagen de la toma de las medidas radiométricas en campo.



Figura 24: Diseño de muestreo inicial con 16 muestras por parcela

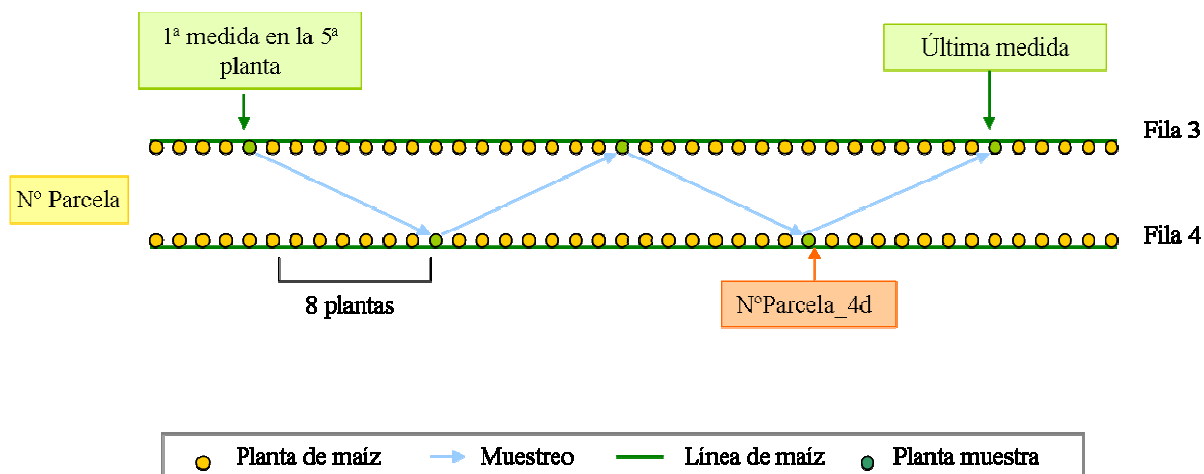


Figura 25: Diseño del muestreo en zig-zag

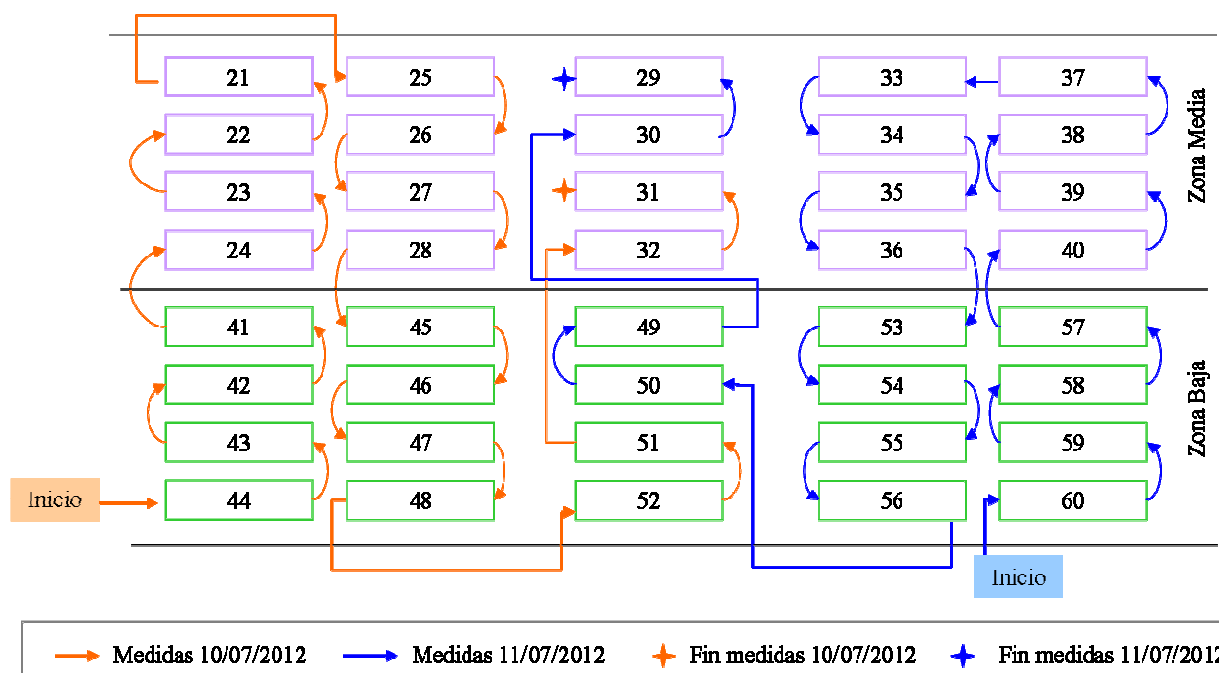


Figura 26: Esquema de los itinerarios seguidos para la toma de muestras.



Figura 27: Detalle de la toma de las medidas radiométricas en campo.

6.3 Toma de medidas radiométricas

Las medidas radiométricas se tomaron previas a la floración cuando el maíz estaba en estado V15. La variabilidad en el ensayo llevó a encontrar plantas con alturas en general entre de 160 y 250cm, decidiéndose situar la sonda del radiómetro a 350cm de altura del suelo para que estuviera 1m por encima de las plantas con más altura; y a 80 cm de la pértiga para asegurar que la misma no interfiere en la medida. El IFOV fue de 25°. De este modo y según el esquema de la Figura 28, las medidas de reflectividad corresponden a la superficie de un círculo de 77cm de radio a ras de suelo y de 22cm cuando la cobertura del maíz es de 250cm.

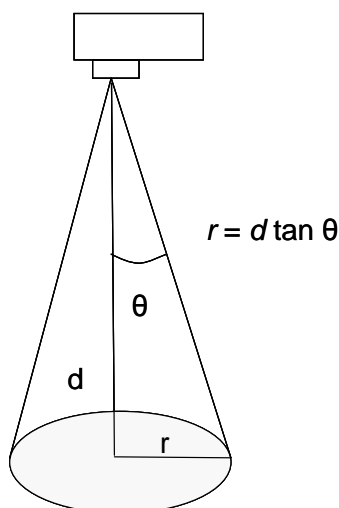


Figura 28: Esquema del IFOV y diámetro de la medida del radiómetro.

Antes de realizar las medidas se determinaba la corrientes oscura y la lectura sobre el panel blanco de referencia (Spectralon) tal y como se ha explicado en el Apartado 4.2.2. Estas medidas se repetían cada cuatro parcelas y se anotaban con diferente nombre para reconocerlas fácilmente. Cada fichero guardado lleva asociada la hora de toma de muestra, información que resulta muy útil a la hora de asignarles el blanco que les corresponde en el procesamiento posterior.

Se comenzaba a medir en la quinta planta contando desde el borde de la fila para asegurar que no se registra el suelo del pasillo. La sonda se situaba justo encima de la planta elegida.

La planta sobre la que se centraba la medida se localizaba con un GPS Trimble Geoexplorer 2008 series, modelo GeoXT que proporciona error, tras postproceso con el programa Pathfinder office, submétrico (0.4m-1m). Concretamente, dicho GPS iba acoplado a un medidor de clorofila con el que se realizaban medidas en las mismas plantas sobre las que se hacía la radiometría.

La información referida a cada lectura radiométrica se almacenó adoptando la siguiente nomenclatura:

P(a)_N°(b)

Ejemplo: P12_5i

Donde,

(a) es el número de parcela

N° es el número de muestra dentro de la parcela

(b) es la situación de la muestra, izquierda (i) ó derecha (d)

De esta manera se puede identificar por el nombre a que muestra y parcela corresponde cada lectura. Todas ellas se almacenaron en carpetas identificadas con la fecha del muestreo.

Aunque inicialmente se pensaban tomar todas las medidas radiométricas en el mismo día, finalmente se tomaron en dos días consecutivos (Figura 29) al no funcionar correctamente el GPS el primer día. Concretamente, la mitad del muestreo se realizó el día 10 de julio de 2012, día en el que se voló para tomar la imagen y la otra mitad el día posterior, 11 de julio. En ambos casos se tiene el mismo número de parcelas estando representadas todas las estrategias de abonado nitrogenado. Queda asegurada por tanto tener un muestreo representativo con la localización de las plantas muestreadas. Las condiciones climatológicas fueron similares en ambos días, con cielos despejados en las horas de muestreo, de 10h 30' a 12h 15' hora solar el día 10 y de 10h15' a 12h00' hora solar el día 11.

6.3.1 Problemas detectados

Con la corriente oscura

El análisis posterior de la firmas espectrales obtenidas para la vegetación parecen indicar que se sobreestimó el mismo pues en algunas longitudes de onda del visible, principalmente en la región del azul y rojo, la reflectividad sale negativa. Se realizaron algunas pruebas para constatar que no era un problema del radiómetro o de la fibra. La causa se achaca a la toma de la corriente oscura fuera de las parcelas, en el pasillo, donde hay más iluminación, más calor y menos humedad que dentro de las parcelas de maíz.

Con el blanco de referencia

La comparación de las diferentes lecturas del panel blanco de referencia realizadas durante la toma de medidas radiométricas mostró que en ocasiones no se habían grabado correctamente quedando registrado el blanco tomado con anterioridad. Se precisa repasar el protocolo de toma de medidas pues esto ocurre siempre que se hace referencia al blanco sin haber tomado anteriormente corriente oscura.

6.4 Muestreo en campo de información adicional

Simultáneamente a la toma de muestras de radiometría, otra persona tomaba lecturas con un medidor de clorofila SPAD-502Plus (Figura 29) que de forma no destructiva mide el estado nutricional. Las lecturas se tomaron inmediatamente antes que las medidas radiométricas y sobre la misma planta muestra, concretamente en la parte central de la hoja de inserción de la mazorca. Se tomaron dos lecturas por planta, calculándose posteriormente el valor medio.



Figura 29: Equipo de medición de clorofila

7. EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN DE LA IMAGEN MULTIESPECTRAL DEL ENSAYO DE MAÍZ

De cada parcela de ensayo se ha extraído para las dos filas centrales de maíz, siguiendo dos procedimientos diferentes, el nivel digital medio de las bandas 2, 3 y 4 y de dos índices espectrales, el índice de vegetación de diferencia normalizada, (NDVI) y el Índice de vegetación verde de diferencia normalizada (GNDVI). La información radiométrica obtenida de las imágenes por diferentes procedimientos se va a relacionar entre otras cosas con el contenido en clorofila y abonado nitrogenado.

7.1. Los índices espectrales

El NDVI (Rouse et al. 1974) combina la banda del rojo y del infrarrojo cercano de la siguiente forma:

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

Dónde:

NIR: banda del infrarrojo cercano

R: banda del Rojo

Este índice se basa en contraste espectral que la vegetación sana presenta, con baja reflectividad en la banda del rojo y reflectividad mucho más altas en la banda del infrarrojo cercano (Chuvieco 2002). Su valor varía entre valores de -1 y 1, siendo 0.7 valor de cubierta densa.. El NDVI es el índice más utilizado en aplicaciones agronómicas de teledetección ya que reúne tres características importantes: su sencillez de cálculo, su fácil interpretación y su poder de normalización de la respuesta espectral de sistemas de vegetación, alcanzando un alto grado de correlación con parámetros de de interés agronómico (Sobrinó 2000).

El GNDVI (Gitelson et al, 1996) relaciona la reflectividad en el infrarrojo cercano (NIR) con la banda del verde. Este índice varía también entre -1 y 1 y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G}$$

Dónde:

NIR: banda del infrarrojo cercano

G: banda del Verde

El GNDVI es más sensible que el NDVI a los parámetros biofísicos cuando los niveles de los mismos son elevados. Este índice es resistente también a los efectos atmosféricos, ya que tiene un mayor rango dinámico que el NDVI.

El cálculo de dichos índices se ha realizado utilizando la herramienta de *Spatial Analyst Tools/Map Algebra/raster calculador* y las capas ráster correspondientes a cada banda que interviene en el índice.

En la Figura 30 se muestra un ejemplo de las imágenes resultantes después de calcular cada uno de los índices.

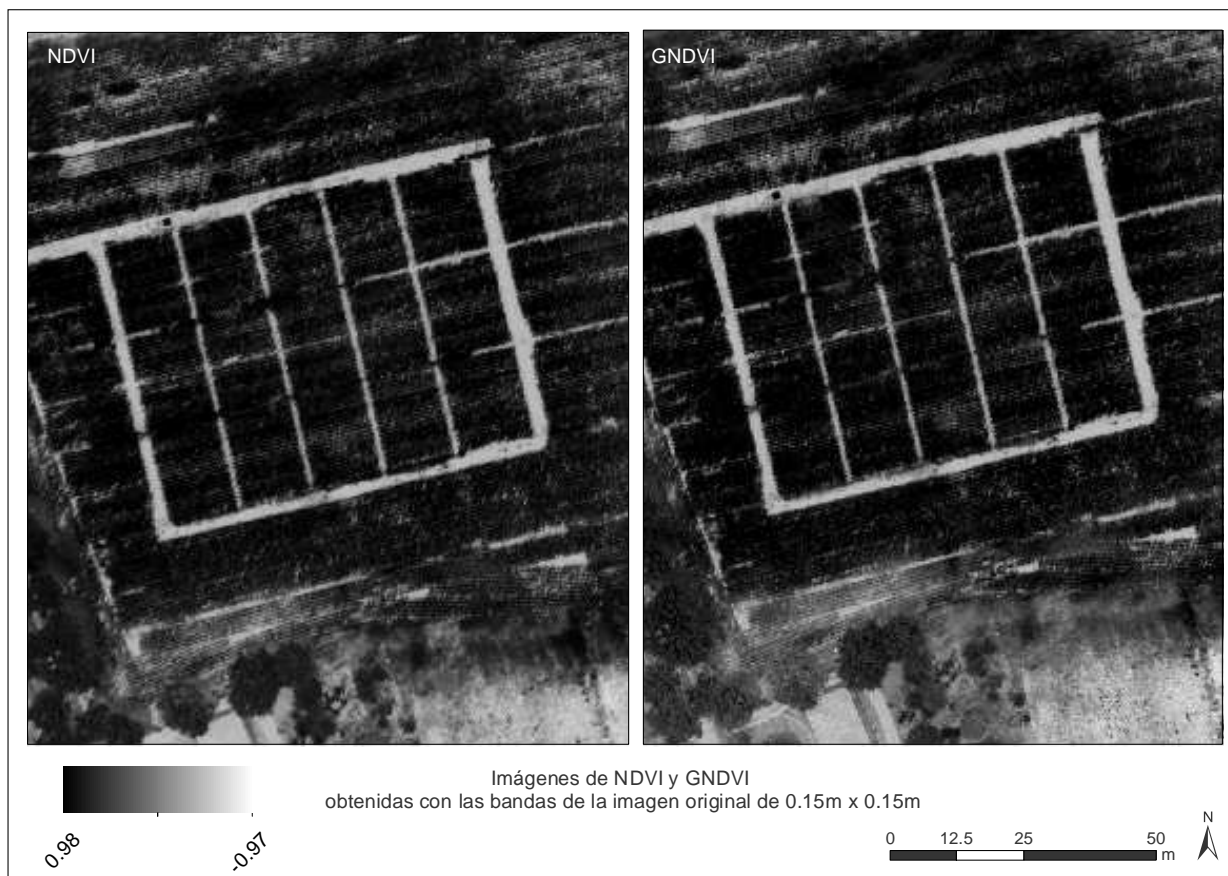


Figura 30: NDVI y GNDVI calculados para la imagen original de 0.15m x 0.15m

7.2. La extracción de la información

Los dos procedimientos seguidos han sido:

- Con una máscara de las dos filas centrales de la parcela
- Con una máscara sobre cada punto de muestreo de radiometría de campo.

El procedimiento seguido en el primer caso ha quedado descrito en el Apartado 5.2, habiéndose extraído la información de las 40 parcelas estudiadas.

Se describe a continuación el procedimiento seguido en el segundo caso que sólo se ha aplicado a las 20 parcelas en las que se localizaron los puntos de muestreo con GPS.

Las lecturas de SPAD se tomaron el día 11/07/2012 y en el mismo punto que se realizaba la lectura se recogían las medidas radiométricas de las plantas de maíz. Al lector SPAD se le acopló un GPS, que recogía las coordenadas longitud-latitud para cada una de las medidas realizadas. Estas coordenadas permitirán posicionar el punto donde se realizaban las medidas de SPAD y las medidas de radiometría de la vegetación que se han realizado a la vez.

Una vez recogidos los datos en campo, hay que depurarlos, es decir, eliminar aquellos puntos que están repetidos o que se habían marcado como erróneos y que pueden dar errores a la hora de analizar los datos. Con los datos válidos se conforma una tabla que se incluirá en ArcGIS.

Esta tabla se pueden integrar en ArcGIS 10 como datos “x” e “y”: Para ello en primer lugar hay que asignar en ARCGIS el sistema de coordenadas geográficas en el cual el GPS ha recogido los datos de campos. Después se le asigna la proyección adecuada, en este caso: ED-1950-UTM-30N.prj, para la correcta visualización junto con la imagen del ensayo de maíz. Con esto valores de SPAD se habrá generado una capa vectorial de puntos dónde se pueden visualizar.

Al superponer la capa de puntos con la localización de las medidas SPAD sobre la imagen, se observó que las medidas no estaban ubicadas en la fila correspondiente (3-4) si no que tienden a situarse sobre la fila 2-3. Esto es debido a que con el sistema combinado SPAD-GPS, el GPS se posiciona con el sistema WGS 84 long-lat no proporcionando la información necesaria para realizar el post-proceso con una base de referencia (ej. Huesca o la Rioja). Esto hace que haya que desplazar los puntos manualmente a su posición real, lo que es posible ya que se sabe que deben estar sobre las filas 2 y 3 y que se comenzada en cada fila a leer en la quinta planta. Así, para situarlos correctamente se dibujaron unas líneas sobre cada una de las filas de muestreo, que sirven como guía en la imagen y otras líneas a los laterales de las parcelas, que delimitan el comienzo y el final del muestreo de SPAD. El resultado final se muestra más detalladamente en la Figura 31.

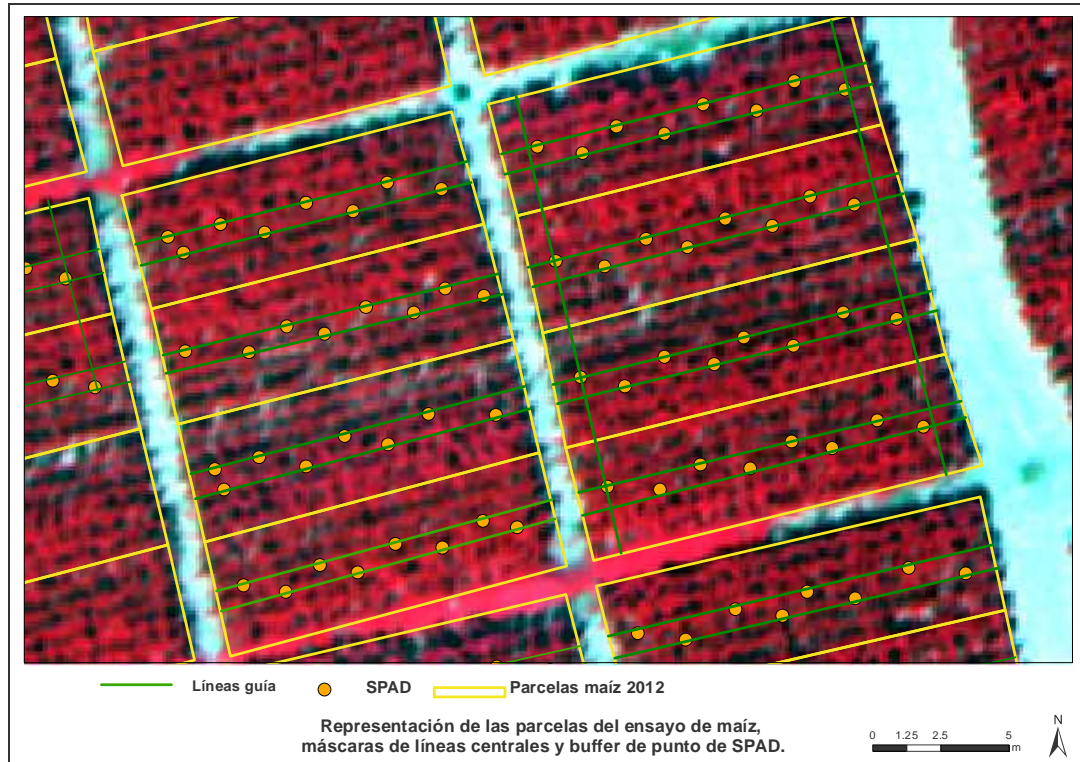


Figura 31: Detalle de la ubicación de las medidas de SPAD sobre parcelas del ensayo de maíz.

Una vez situados todos los puntos ya se puede extraer información de las diferentes bandas el NDVI y GNDVI para cada uno de esos puntos de muestreo. En la Tabla 9 se muestra un extracto de la tabla de atributos asociada a la capa de puntos lecturas-SPAD

Tabla 9: Extracto de algunos valores de la tabla de atributos de localización de las medidas de SPAD.

Id	Parcela	Nº muestra	Tratamiento	Media_spad	Desv_spad	Observaciones_
1	60	P60_1i	T1	56.95	7.42	muestras 1-2
2	60	P60_2d	T1	54.10	1.84	muestras 3-4
3	60	P60_3i	T1	56.15	1.77	muestras 5-6
4	60	P60_4d	T1	54.60	2.69	muestras 7-8
5	60	P60_5i	T1	60.05	2.33	muestras 9-10
6	60	P60_6d	T1	57.00	1.08	muestras 11-12
7	60	P60_7i	T1	54.60	0.85	muestras 13-14
8	60	P60_8d	T1	55.10	0.28	muestras 15-16
9	59	P59_1i	T2	52.20	3.96	muestras 1-2
10	59	P59_2d	T2	58.95	6.01	muestras 3-4
11	59	P59_3i	T2	56.30	9.48	muestras 5-6
12	59	P59_4d	T2	54.90	0.85	muestras 7-8
13	59	P59_5i	T2	60.15	7.42	muestras 9-10
14	59	P59_6d	T2	61.10	5.66	muestras 11-12
15	59	P59_7i	T2	57.60	9.62	muestras 13-14
16	59	P59_8d	T2	56.85	3.46	muestras 15-16

Para realizar la extracción de datos se creó un buffer alrededor de cada una de los puntos de muestreo. El radio del buffer elegido fue de 22cm para recoger exactamente la misma superficie de la que se están tomando medidas radiométricas en el maíz (Ver Apartado 6.3). El buffer se usó como máscara para extraer la información de las bandas de interés y de los índices calculados con la imagen del ensayo del maíz (Figura 32). Con dicha máscara y siguiendo el mismo procedimiento mostrado en la Figura 20 se obtuvieron valores medios de los niveles digitales de las bandas y de los índices en cada punto de muestreo. El valor por parcela se obtuvo así mismo como media de los valores de los ocho puntos.

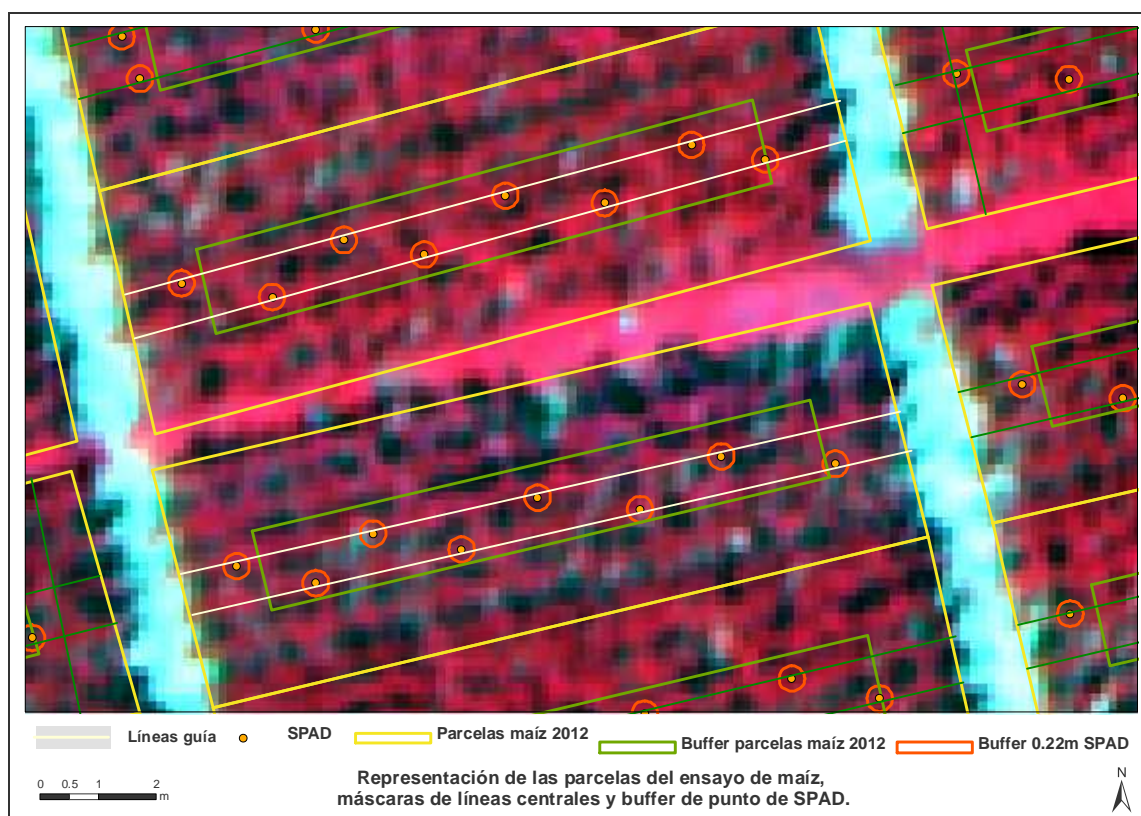


Figura 32: Buffer de los puntos de SPAD de 0.22cm.

8. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DERIVADA DE TELEDETECCIÓN Y SU RELACIÓN CON EL CONTENIDO EN CLOROFILA EN EL ENSAYO DE MAÍZ

El trabajo desarrollado durante los tres meses que han durado las prácticas ha consistido principalmente en la adquisición y preparación de gran cantidad de información que todavía debe procesarse y analizarse. En este apartado se exponen algunos ejemplos de resultados preliminares.

8.1 Tamaño de la muestra y representatividad

Se presenta la comparación de algunos resultados obtenidos con dos muestras de diferente tamaño. La información derivada de este tipo de análisis puede ayudar a determinar el tamaño de la muestra en futuros trabajos y muestreos en ensayos similares.

▪ Contenido en clorofila

Se han comparado dos medidas de SPAD realizadas en las mismas parcelas cuando el cultivo se encontraba en estadio V15:

- SPAD-Radiometría: Medidas realizadas los días 10 y 11 de julio de 2012 a la vez que se tomaron las medidas de radiometría. Se muestrearon 8 plantas por parcela.
- SPAD- Abonado: Medidas realizadas en el proyecto de investigación el día 12 de julio con fines de ajustar la dosis de abonado nitrogenado. Se muestrearon 30 plantas por parcela.

En ambos casos la lectura SPAD medias por parcela varía entre 48 y 60 siendo el SPAD medio de todo el ensayo es mayor en SPAD-Abonado que en SPAD-Radiometría (Tabla 10).

Tabla. 10. Valores máximo, mínimo, media y desviación estándar de los valores de SPAD-Radiometría y SPAD-abonado.

	Máximo	Mínimo	Media	Desviación
SPAD-Radiometría	60.08	47.83	55.63	3.12
SPAD-Abonado	60.50	47.80	56.82	3.26

El coeficiente de correlación de Pearson entre los valores medios de cada parcela con SPAD-Abonado y con SPAD –Radiometría es de 0.86 (significativo al 99%) indicativo de que hay una buena correlación entre ellos. A pesar de la alta correlación la prueba de comparación de medias emparejadas ha detectado la existencia de diferencias significativas entre los valores de SPAD tomados en ambos muestreos. En la Figura 33 puede observarse como la recta de regresión ajustada se sitúa por debajo de la línea 1:1 con una pendiente significativa distinta de 1 ($p < 0.005$).

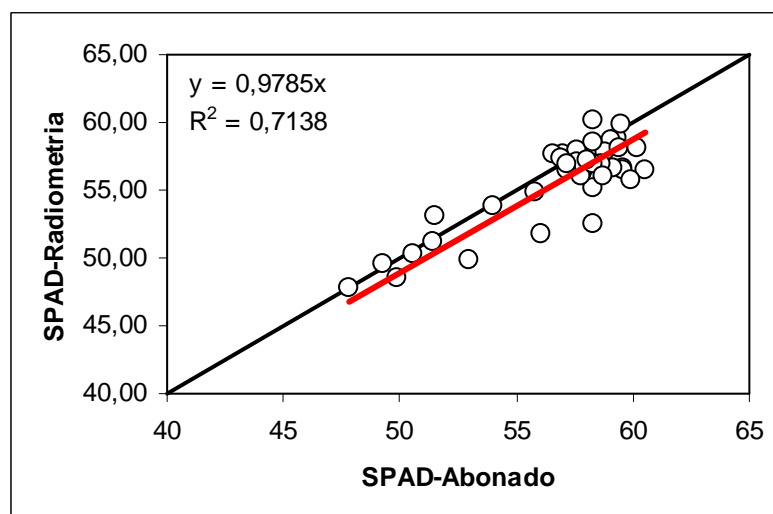


Figura 33. Relación entre los valores medios de SPAD-Radiometría y SPAN-abonado con la ecuación lineal ajustada (línea roja) y la recta 1:1 (línea negra)

En la Figura 34 se representa el valor medio de SPAD obtenido para cada parcela. Se observa que como norma general los valores de SPAD-abonado se sitúan por encima de las lecturas de SPAD-radiometría y sólo 8 de las 40 parcelas el valor medio de SPAD-Radiometría es superior al de SPAD-Abonado. Parte de estas diferencias podrían ser debidas a que las medidas de SPAD-Radiometría se realizaron entre 1 y 2 días antes de las de SPAD-abonado, es decir puede existir un efecto temporal.

Las máximas diferencias entre ambas medidas se dan en las parcelas 48, 44, 43, y 33 con valores superiores a 4; seguidas de las parcelas 24, 53, 31 y 23 donde las diferencias son superiores a 3 unidades. Se precisa un análisis más profundo para determinar a que se deben estas diferencias.

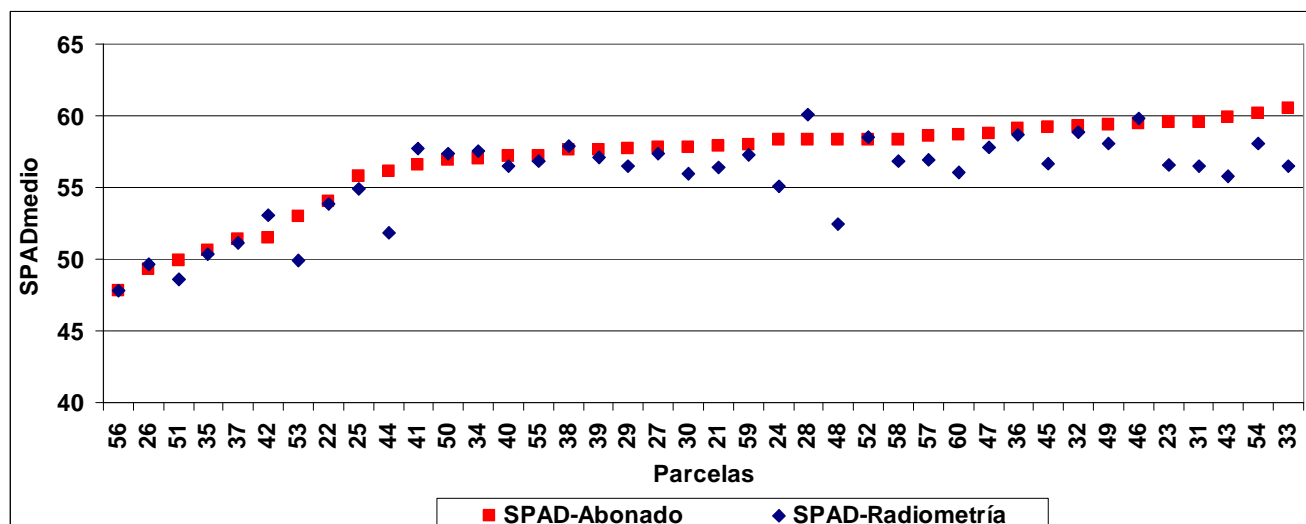


Figura 34. Comparación de los valores medios de SPAD-abonado y SPAD-radiometría en cada una de las parcelas (eje X).

▪ Índices de vegetación

Se han comparado así mismo los índices de vegetación de 20 parcelas obtenidos de la imagen multiespectral con dos muestras diferentes:

- NDVI-filas y GNDVI-filas: Media del índice de los píxeles correspondientes a las dos filas centrales (ver Apartado X). Por término medio en cada parcela se tienen 663 píxeles.
- NDVI-puntos y GNDVI-puntos: Media de los índices obtenidos para cada punto de muestreo radiométrico (ver Apartado 7.2). En cada parcela se tienen 8 puntos de muestreo y a cada punto se le han asignado 7 píxeles de media para hacer el cálculo.

Los valores, máximos, mínimos y medido de los índices para estas 20 parcelas son muy similares en las dos series de datos utilizadas, tal y como puede verse en la Tabla 11.

Tabla 11: Valores estadísticos de los índices para las 20 parcelas de estudio.

	Máximo	Mínimo	Media	Desviación
NDVI-filas	0.74	0.62	0.70	0.03
NDVI-puntos	0.75	0.63	0.70	0.03
GNDVI-filas	0.53	0.40	0.49	0.03
GNDVI-puntos	0.53	0.45	0.49	0.03

El coeficiente de correlación de Pearson entre NDVI-filas y NDVI-puntos es de 0.89 (significativo al 99%) mientras que entre GNDVI-filas y GNDVI puntos es de 0.93 (significativo al 99%). A pesar de la correlación significativa entre ambas variables la prueba de comparación de medias emparejadas ha detectado la existencia de diferencias significativas entre los valores de los dos índices cuando se utilizan las dos filas centrales y cuando se utilizan los puntos de muestreo del SPAD. En la figura 35 puede observarse como para los dos índices (NDVI y GNDVI) las rectas de regresión ajustadas se sitúan por encima de la línea 1:1 con una pendiente significativamente distinta de 1 ($p < 0.005$).

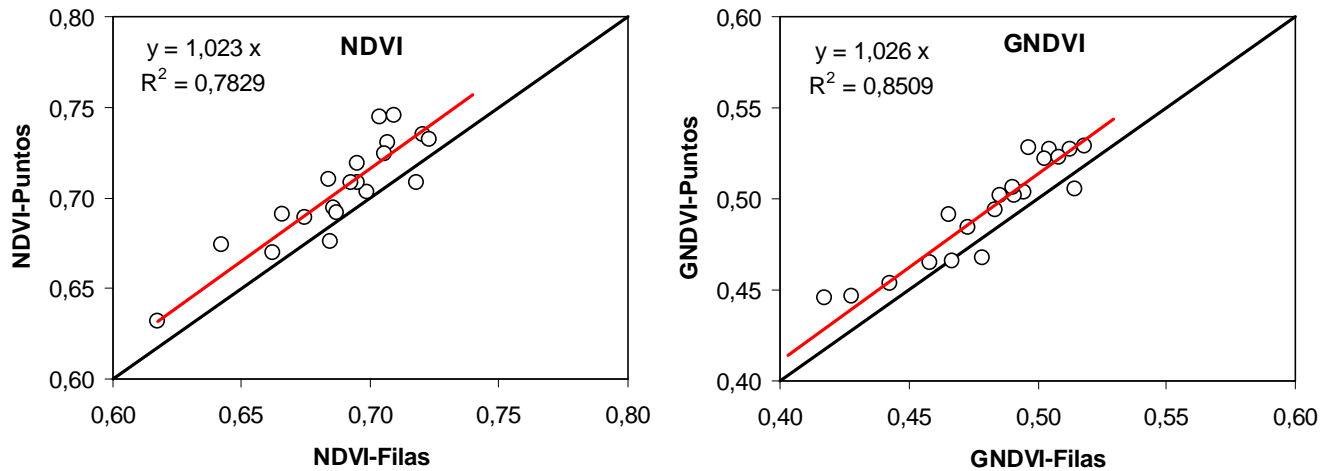


Figura 35. Relación entre los valores medios de los índices de vegetación (NDVI, GNDVI) obtenidos de la máscara que contiene las dos filas centrales (NDVI-Filas, GNDVI-Filas) o de los puntos donde se realizaron las medidas radiométricas en la parcela (NDVI-Puntos, GNDVI-Puntos) con la ecuación lineal ajustada (línea roja) y la recta 1:1 (línea negra)

En la Figura 36 se ve como en general hay una buena concordancia entre los índices obtenidos por una u otra forma, aunque casi siempre los valores de los índices de vegetación obtenidos de los puntos de muestreo se sitúan por encima. . Al igual que con la comparativa anterior habrá que analizar con más detalle aquellas parcelas en las que hay cierta diferencia.

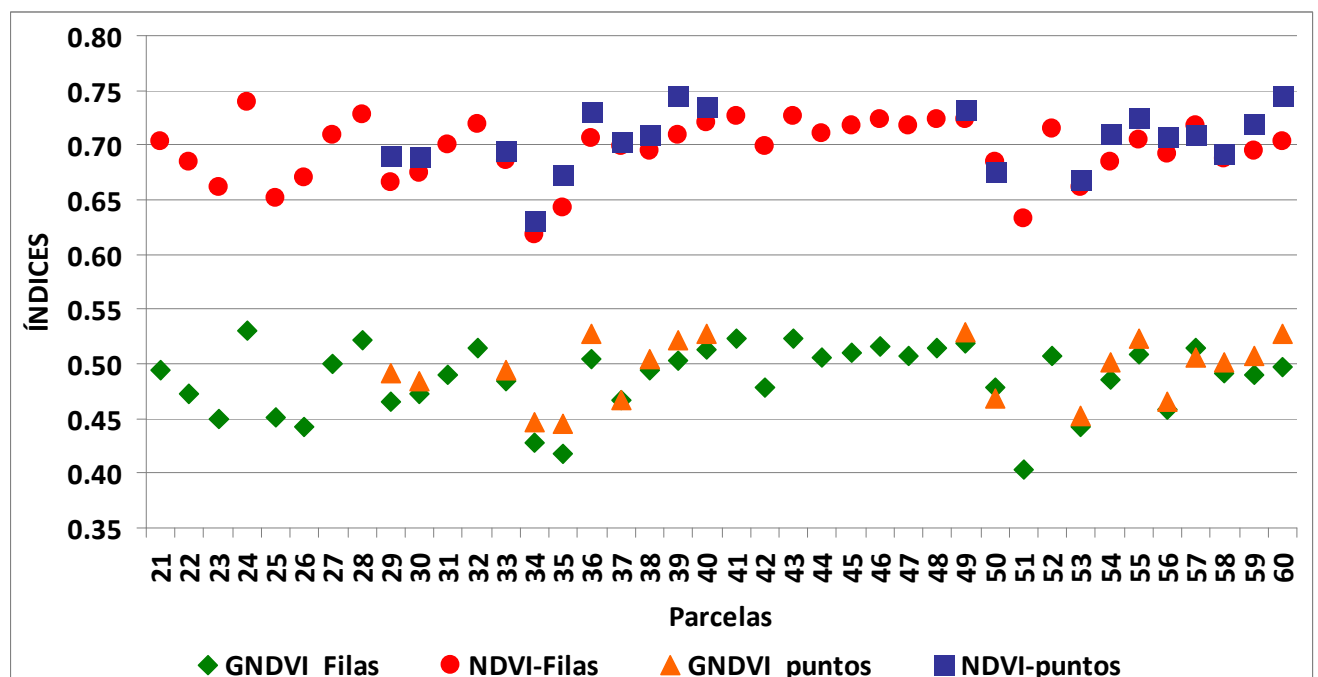


Figura 36. Comparación de los valores medios de los índices NDVI y GNDVI obtenidos a partir de valores puntuales o de la máscara que contiene las dos filas centrales de cultivo de la parcela para cada una de las parcelas (eje X).

La información obtenida de la máscara con dos filas es mas representativa del comportamiento medio de la parcela, lo que indica que para caracterizar el comportamiento medio de la parcela mediante radiometría es necesario muestrear un mayor número de puntos o aumentar la superficie de muestreo tomada con el radiómetro. Por otro lado, se observa que los índices obtenidos con un menor número de puntos se sitúan siempre por encima del valor medio obtenido para la superficie total. Esto podría indicar una selección de los puntos de muestreo sesgada, si bien no parece ser esa la causa pues el muestro fue sistemático aleatorio. Además la información comparativa de los valores de SPAD que se presenta en la Figura 34 muestran que las lecturas de SPAD con un menor número de puntos (SPAD radiometría) fueron comparativamente mas bajas que las obtenidas de 30 puntos (SPAD abonado), que son mas representativa del comportamiento medio de la parcela. Posiblemente la causa de las diferencias observada entre el valor de los índices obtenidos con muestra más pequeña (índice-punto) y los de muestra más grande (índice-filas) se deba al tamaño del buffer seleccionado. Hay que tener en cuenta que el ensayo era muy heterogéneo presentando las plantas un desarrollo desigual. El buffer elegido selecciona principalmente los píxeles correspondientes a la fila, es decir, únicamente a plantas de maíz, dejando fuera píxeles que corresponden al espacio entre filas dónde la cobertura de la planta es menor (Figura 32). En cambio cuando se coge la máscara de la parcela todas estas superficies están incluidas, de ahí que los índices sean más bajos. Habrá que plantear estudios complementarios utilizando diferentes tamaños de buffer para ver su efecto en los resultados, en la información derivada.

Es necesario profundizar en analizar la representatividad de las medidas radiométricas y es prioritario establecer metodologías o protocolos de trabajo que incluyan requerimientos y necesidades mínimas para que los muestreos radiométricos sean representativos del comportamiento de las superficies a las que se quiere representar. .

8.2 Relación datos de las imágenes con contenido en clorofila

En la Tabla 12 se presentan las correlaciones entre lecturas de SPAD y los niveles de digitales de la banda verde (ND_G), banda roja (ND_R), $NDVI$ y $GNDVI$ obtenidos de la imagen del 10 de julio de 2009 del ensayo de maíz para la máscara de las dos filas centrales de la parcelas de ensayo. En el análisis no se ha incluido la parcela 23 por haberse tomado los datos de SPAD en otras filas (Ver apartado 6.2).

Tabla 12. Correlaciones entre lecturas de SPAD y variables derivadas a partir de imágenes (NDx e índices de vegetación) en tres ensayos de maíz para las dos filas centrales de las parcelas de ensayo.

Variables	Almudévar 2012	Zaragoza 2010(1)	Albacete 2010(1)
	n=39	n=63	n=51
NDG	-0.63***	-0.86	-0.67
NDR	-0.40*	-0.79	-0.49
NDVI	0.46**	0.74	0.55
GNDVI	0.66***	0.83	0.70

(1) Datos de Isla et al (2011).

(2) Asteriscos indican correlación significativa * $0.01 < p < 0.05$ ** $0.001 < p < 0.01$ y *** $p < 0.001$

Las correlaciones son todas significativas ($p < 0.05$) y las mejores correlaciones se obtienen con la banda del verde y el índice $GNDVI$, resultados que concuerdan con los encontrados por Isla et al (2011) en dos ensayos de maíz de características similares al de Almudévar 2012 realizados en 2010, uno en Zaragoza y otro en Albacete.

Sin embargo, las correlaciones del ensayo de Almúdevar en 2012 son menores que las obtenidas en los ensayo de 2010, más parecidas a las del ensayo de Albacete que las del ensayo de Zaragoza.

8.3 Caracterización espectral de los diferentes tratamientos de abonado nitrogenado

Los problemas surgidos con las medidas radiométricas adquiridas en campo han limitado el desarrollo de esta parte del trabajo. En 16 de las 40 parcelas, se ha podido convertir dichas medidas radiométricas a valores de reflectividad siguiendo el procedimiento indicado en el Apartado 4.

En estas 16 parcelas están representados todas las combinaciones de tratamiento y ambientes estudiados (medio y bajo).

En la Figura 37 se presentan a modo de ejemplo las firmas espectrales medias de cada tratamiento en la zona con disponibilidad media inicial de nitrógeno. Las diferencias más acusadas se dan en la región del verde y del infrarrojo. En la región del verde, entre los 500 y 600nm el tratamiento sobrefertilizado es el que presenta la curva más diferente, con reflectividades ligeramente mayores en casi todo el ancho espectral indicado. Precisamente hacia los 550nm, longitud de banda del verde para las imágenes utilizadas en el trabajo presentado, es donde la curva de reflectividad es más parecida al del resto de los tratamientos. En la región del infrarrojo es donde se aprecian las mayores diferencias entre las firmas espectrales de los distintos tratamientos, siendo la curva espectral correspondiente al tratamiento control la que presenta las menores reflectividades. Llama la atención la menor reflectividad del tratamiento sobrefertilizado respecto al resto de tratamientos que han recibido abonado. Habrá que analizar con más profundidad toda la información en combinación con la información derivada de las imágenes, contenido en clorofila, localización de las parcelas en el terreno, variabilidad dentro de las mismas, y rendimiento para poder determinar y explicar los comportamientos espectrales encontrados.

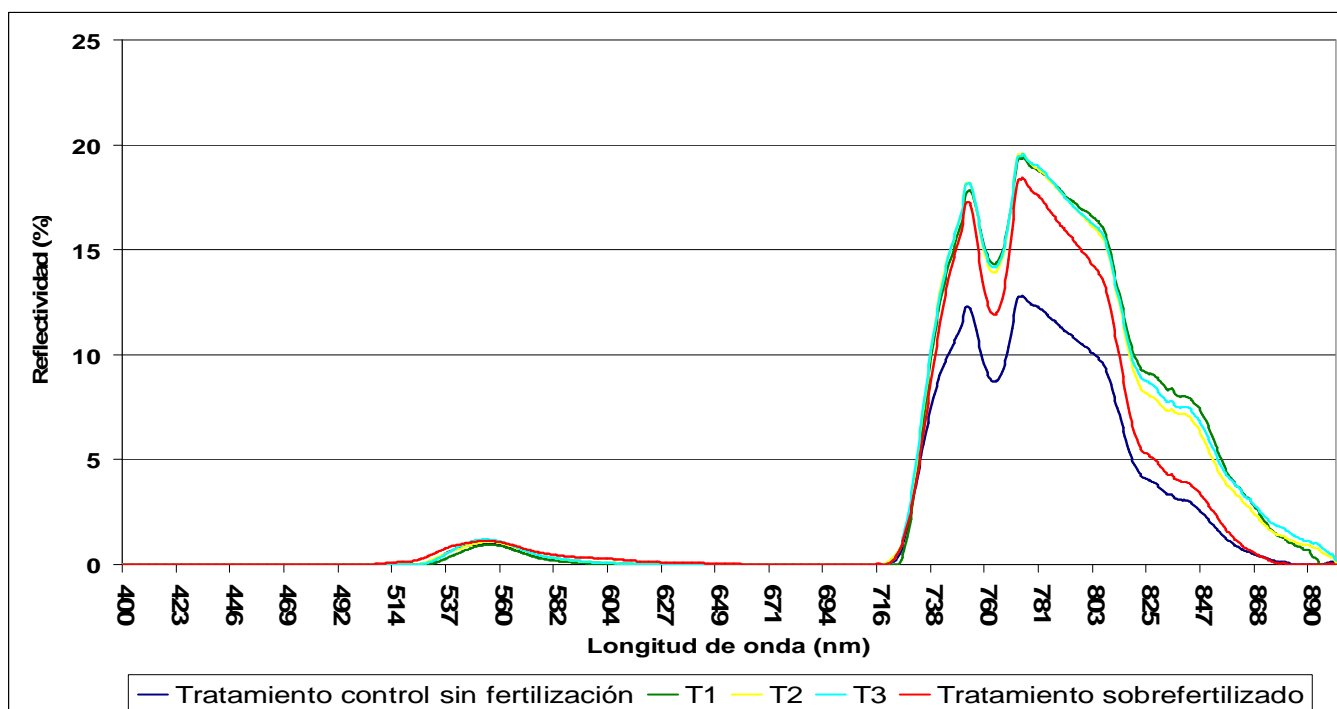


Figura 37: firmas espectrales medias de cada tratamiento en la zona con disponibilidad media inicial de nitrógeno

9. RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS POSTERIORES

La utilización de imágenes multiespectrales y radiometría de campo junto con la información recogida de algunas variables biofísicas del cultivo como es el contenido en clorofila (mediciones de SPAD) pueden ser un apoyo para la toma de decisiones en recomendaciones de abonado nitrogenado. Los trabajos realizados han proporcionado una gran cantidad de datos que permitirán profundizar en este tema.

Los dos modelos de ajuste lineal probados para la calibración de las imágenes multiespectrales adquiridas con el sensor DMSC, $R = a + b \cdot ND/10000$ y $R = a + b \cdot EXP(ND/10000)$, han proporcionado en todos los casos ajustes estadísticamente significativos a un nivel de probabilidad $p < 0.001$ y coeficientes de determinación (R^2) superiores para todas las bandas al 85%, lo que indica buenos ajustes. Sin embargo, analizando el procedimiento seguido se recomienda en el futuro, siempre que sea posible, hacer una buena selección de las superficies de control de tal manera que se encuentren ampliamente distribuidas en las longitudes de onda que son de interés para el estudio. Asimismo, elegir un número suficiente de superficies control de modo que se disponga de una serie de superficies para realizar la calibración y de otra serie distinta para realizar una validación que permita definir la calidad de la calibración. Además debe asegurarse que las superficies elegidas son homogéneas espectralmente y suficientemente amplias para no tener un espectro correspondiente a mezclas de superficies. Ello proporcionará mayor validez a los ajustes que se realicen.

En cuanto al tamaño de píxel de las imágenes, se ha visto que existe una alta correlación entre la información obtenida de la imagen original y las imágenes de distinto tamaño de píxel hasta llegar a 1.8m, con coeficientes de correlación muy significativos y superiores a 0.92. A partir de un tamaño de píxel de 0.6 m x 0.6m se capta una parte importante de información de fuera de la máscara de las dos filas centrales de la parcela, pero esta información no es muy diferente de la interior a la máscara siempre que el tamaño de píxel no sobrepase los 1.8m. Todo ello indica que se podría disminuir la resolución de la imagen, abaratándose el precio de la misma.

Los problemas surgidos en la adquisición de la información radiométrica recogida para caracterizar espectralmente diferentes estados nutricionales del maíz, validar la información derivada de las imágenes e intentar establecer modelos o relaciones empíricas entre contenido en clorofila de la planta y reflectividad han limitado el desarrollo de dichas actividades. Se debe revisar el protocolo de adquisición de datos radiométricos en campo e incluir especificaciones relativas a la toma de corriente oscura para registrar siempre correctamente las lecturas del panel de referencia y evitar la sobreestimación de la misma tras los fallos detectados. Asimismo, se deberá revisar la forma de localización de los puntos de muestreo (posicionamiento y precisión del GPS) si se quieren hacer comparaciones puntuales de las variables adquiridas en el ensayo (SPAD, reflectancia, ND de las imágenes, etc) en lugar de utilizar medias por parcela.

En cuanto al muestreo diseñado para la adquisición de variables de interés en el ensayo, como toma en campo de medidas radiométricas, lecturas SPAD, y otras derivadas de las imágenes, los resultados preliminares obtenidos en el trabajo indican la necesidad de ajustar aspectos en relación a la representatividad de las medidas realizadas si se quiere caracterizar con ellas el comportamiento medio en la parcela de las diferentes variables estudiadas.

Los análisis de datos comenzados deben completarse, realizando asimismo estudios que integren toda la información obtenida (información derivada de las imágenes, contenido en clorofila, rendimiento, etc.) e incluyan, junto con el análisis estadístico de los datos, un análisis espacial de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

- Andreu J., J. Betrán, I Delgado, J.L.. Espada, M. Gil, M. Gutiérrez, F. Iguácel, R. Isla, F Muñoz, F. Orús, M. Pérez, D. Quílez, E. Sin, M.R:Yagüe. (2006). Fertilización nitrogenada. Guía de actualización. Gobierno de Aragón. Departamento de Agricultura y alimentación.
- Aparicio, N., D. Villegas, J. Casadesus, J.L Araus, and C. Royo. (2000). Spectral vegetation indices as nondestructive Tools for determining durum wheat yield. *Agron. J.* 92:83-91.
- Blackmer, T.M,J.S. Schepers, G.E. Varvel and E.A. Waltershea. (1995) Nitrogen deficiency detection capabilities of reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agron. J.* (In press).
- Blackmer, T.M y J.S. Schepers (1995). Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. *J. Prod. Agric.* 8.
- Chang K.W.,Y. Shen, J.C Lo (2005). Predicting rice yield using canopy reflectance measured at booting stage. *Agronomy journal*, 97, 872-878.
- Chuvieco, E. (2002): Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio. Barcelona, Ariel Ciencia.
- Daughtry, C.S.T., C-L. Walthall, M.S Kim; E. Brown de Colstoun, J.E. McMurtrey III, (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote. Sens. Environ.* 74: 229-239.
- De Miguel, E., J.G. Rejas, M. Jiménez y G. Fernández. (2001). Calibración radiométrica de datos ATM mediante radiometría de campo. *Teledetección, medio Ambiente y Cambio Global.* 465-468.
- Dingirard, M. y P.N. Slater. (1999). Calibration of space-multispectral Imaging sensors: A review. *Remote Sens. Environ.* 68: 194-205.
- Esri (2010): ArcGIS 10.0.
- Filella, I., L.Serrano, J., Serra, J., Peñuelas. (1995). Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop science* 35.
- García A., (2011). Apuntes de teoría de la asignatura: "Tratamiento digital de las imágenes satélite". Departamento de geografía y ordenación del territorio. Universidad de Zaragoza.
- Gilbert, M. A., J. Gonzalez-Piqueras, et al. (2002). "A generalized soil-adjusted vegetation index" *Remote Sensing of Environment* 82(2-3): 303-310.
- Gitelson, A. A.,Kaufman, Y.J. and Merzlyak, M.N (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens.Environ.*,58, 289-298.
- Haboudane, D., J.R., Miller, N., Tremblay, P.J., Zarco-Tejada, y L., Dextraze. (2002). Integrated narrowband vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote sensing of environment*, 81 (2-3), 416-426.
- Honkavaara, E., Arbiol, R., Markelin, L., Martinez, L., Cramer, M., Bovet, S., Chandelier, L., Ilves, R., Klonus, S., Marshal, P.,Schläpfer, D., Tabor, M., Thom, C., and Veje, N., 2009. Digital airborne photogrammetry A new tool for quantitative remote sensing?—A state-of-the-Art review on radiometric aspects of digital photogrammetric images. *Remote Sensing* 1(3), pp. 577-605.
- Huete, A.R, and R. D, Jackson. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote sensing Environ.* 17, 37-53.
- Inoue, E., Y. Mihara, Y. Tsuboi (1963). Agro-metereological studies on rice growth in Japan. *Agric. Meteor.*2, 85-107.
- Inoue, Y. (2003). Synergy of remote sensing and modeling for estimating ecophysiological processes in plant production. *Plant production Science*, 6(1), 3-16.
- Isla, R. y R., López Lozano. Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz. *Revista de teledetección* 24:5-9.

- Isla R., R. Quílez, F. Valentín, M.A. Casterad, J. Aibar y M. Matutano (2011). Utilización de imágenes aéreas multispectrales para evaluar la disponibilidad de nitrógeno en maíz. XIV congreso de la AET. 9-12.
- Kostrzewski, M., P. Waller, P. Guertin. J., Haberland., P. Colaizzi, E. Barnes, T. Thomson, T. Clarke, E. Riley, C. Choi, (2002). Ground-based remote sensing of water and nitrogen stress. *Trans. Of ASAE* 45(6): 29-38
- Montorio R., (2011). Apuntes de teoría de la asignatura "Principios, instrumentos y métodos de recogida de información espacial: radiometría de campo". Departamento de geografía y ordenación del territorio. Universidad de Zaragoza.
- Plant, R.E, D.S., Munk, B.R Roberts, R.L.Vargas, D.W. Rains, R.L Travis, R.B Hutmacher. (2000). Relationships between remotely sensed reflectance data and cotton growth and yield. *Transaction of the ASAE*, 43(3), 535-546.
- Rouse, J.W., R.H., Haas, J.A., Schell and D.W., Deering (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with ETRS. Third ERTS Symposium, vol.11. NASA. 309-317pp.
- Sobrino, J.A (2000). Teledetección. Guada impresiones S.L. Universidad de Valencia. 460 pp.
- Sripada, R.P., J.P.Schmidt, A.E. Dellinger, and D.B. Beegle (2008). Evaluating multiple indices from a canopy reflectance sensor to estimate corn N requirements. *Agronomy Journal* 100:1553-1561.
- Stroppiana, D., M. Boschetti, P.A. Brivio and S. Bocchi. (2006) Remotely sensed estimation of rice nitrogen concentration for forcing crop growth models. *Italian journal of Agrometeorology* (3) 50-57.
- Wiegand, C.L., A.J. Richardson, R.D. Jackson, P.J. Jr, Pinter, J.K., Aase, D. E., Smika, L.F. Lautenschlager, J.E., McMurtrey III. (1986). Development of agrometeorological crop model inputs from remotely sensed information. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24, 90-97.
- Wright, D. L. Jr, 2003. Using Remote Sensing to Manage Wheat Grain Protein. Final report for Utah State University Affiliated Research Center, Earth Science Applications Directorate NASA Science Enterprise. Pp. 1-8.
- Xue, L. and L. Yang (2008). "Recommendations for nitrogen fertiliser topdressing rates in rice using canopy reflectance spectra." *Biosystems Engineering* **100**(4): 524-534.

<http://www.idae.es/index.php>

<http://sitar.aragon.es/>