

Trabajo Fin de Máster

Título del trabajo: Estimación del rendimiento de trigo con imágenes UAV: aplicación en el contexto de la agricultura de precisión.

English tittle: Wheat yield estimation with UAV images: application in the precision agricultura context

Autor/es

Víctor Manuel Parra González

Director/es

Raquel Montorio Llovería

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
2016

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE TRIGO CON IMÁGENES UAV: APLICACIÓN EN EL CONTEXTO DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Autor: Víctor Manuel Parra González

Director: Raquel Montorio Llovería

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Noviembre de 2016



Universidad
Zaragoza

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



*La agricultura es el arte que enseña virtud al hombre
y la base de la opulencia a todas las naciones.*

(Gaspar Melchor de Jovellanos)

Resumen

La agricultura de subsistencia ha ido desapareciendo dando paso a una agricultura intensiva. Esta ha evolucionado hacia la llamada agricultura de precisión, fomentada por la búsqueda de una mayor productividad. La Teledetección ha ayudado a este proceso mediante la captura de imágenes asistidas por satélites y, más tarde, debido a la necesidad de un mayor avance, mediante UAV (Unmanned Aerial Vehicle- vehículo aéreo no tripulado) ofreciendo así una mayor resolución espacial. En el presente proyecto se tiene como objetivo principal estimar la producción de trigo y demás variables agronómicas a partir de informaciónpectral obtenida mediante un UAV con resolución espacial de 10 centímetros.

*Los resultados han mostrado que la imagen analizada, parcela cultivada con trigo blando (*Triticum aestivum*), presenta una infraestimación en las bandas del rojo y del verde, respecto a la signatura espectral del trigo, y que la producción no muestra unos resultados esperables a los distintos tratamiento de abonado aplicados a cada una de las subdivisiones parcelarias. Aún así, se concluye que el mejor proceso para la estimación de la producción de trigo es la utilización del índice de Vegetación NDVI mediante la metodología de extracción básica eliminando solo los píxeles mixtos (metodología 1). También se observa una relación entre los índices de Vegetación NDVI y RVI con el abonado aplicado mostrando, por tanto, una relación con la vigorosidad de la planta.*

Palabras Clave: UAV, trigo, estimación, agricultura, índices de vegetación.

Abstract

Subsistence agriculture has disappeared, giving access to intensive agriculture. This agriculture has evolved towards so-called precision agriculture, fomented by the searching of greater productivity. Remote sensing has helped in the process by capturing satellite images and, later, due to the need for further progress, using UAV (Unmanned Aerial Vehicle) thus providing greater spatial resolution. In the present project the principal objective is the wheat yield estimation with an UAV image with spatial resolution of 10 centimeters.

*The results have shown that the analyzed image, smallholding grown with soft wheat (*Triticum aestivum*), presents an underestimation in the bands of the red and the green, in relation to the spectral signature of the wheat, and that the production does not show expecting results according to the different treatments of fertilization applied to each of the subdivisions. Nevertheless, it is concluded that the best process for the estimation of wheat production is the usage of the NDVI vegetation rate by means of the basic extraction methodology, eliminating only the mixed pixels (methodology 1). A relationship between the NDVI and RVI vegetation rates was also observed with the applied fertilization, showing, therefore, a relation with the vigorousness of the plant.*

Key Words: UAV, wheat, estimation, agriculture, vegetation index.

Índice

| | | |
|--------|---|---------|
| 1. | Introducción | pág. 1 |
| 1.1. | La agricultura de precisión | pág. 2 |
| 1.2. | La teledetección en las aplicaciones de la agricultura de precisión | pág. 3 |
| 2. | Objetivos del proyecto | pág. 4 |
| 2.1. | Objetivos generales | pág. 4 |
| 2.2. | Objetivos específicos..... | pág. 4 |
| 3. | Área de estudio | pág. 5 |
| 4. | Diseño experimental..... | pág. 6 |
| 4.1. | Tratamientos de fertilización aplicados al cultivo..... | pág. 7 |
| 4.2. | Vuelo UAV: características de la imagen multiespectral | pág. 9 |
| 4.2.1. | Comportamiento espectral de la imagen multiespectral | pág. 11 |
| 4.3. | Medición de variables biofísicas en campo..... | pág. 12 |
| 5. | Metodología..... | pág. 16 |
| 5.1. | Generación de neocanales: índices de vegetación y análisis de componentes principales | pág. 16 |
| 5.1.1. | Índices de vegetación | pág. 16 |
| 5.1.2. | Análisis de componentes principales | pág. 18 |
| 5.2. | Extracción de estadísticas zonales | pág. 21 |
| 5.3. | Ánálisis estadístico..... | pág. 24 |
| 6. | Resultados | pág. 24 |
| 6.1. | Valores de los neocanales..... | pág. 24 |
| 6.2. | Valores globales de producción por tratamientos | pág. 26 |
| 6.3. | Estimación de las variables de producción..... | pág. 28 |
| 7. | Discusión | pág. 30 |
| 7.1. | Obtención de una imagen multiespectral con fallos | pág. 30 |
| 7.2. | Índices de vegetación como variable espectral para la estimación de variables agronómicas | pág. 31 |
| 7.3. | Respuesta espectral del trigo a la fertilización | pág. 31 |
| 8. | Conclusiones | pág. 32 |
| 9. | Agradecimientos | pág. 33 |
| 10. | Bibliografía | pág. 33 |
| 11. | Anejos | pág. 36 |
| 11.1. | Anejo 1: Fotografías de cultivo y cosecha | pág. 36 |
| 11.2. | Anejo 2: Variables de producción obtenidas | pág. 41 |
| 11.3. | Anejo 3: Estadísticas básicas zonales | pág. 44 |
| 11.4. | Anejo 4: Script R correlación de Índices de Vegetación | pág. 47 |
| 11.5. | Anejo 5: Script R y resultados estadísticas de T de Student | pág. 48 |
| 11.6. | Anejo 6: Script R correlación datos de producción | pág. 54 |

Índice Figuras

| | |
|--|---------|
| Figura 1.Área de estudio | pág. 5 |
| Figura 2.Esquema cronológico..... | pág. 6 |
| Figura 3.Localización de las parcelas por tratamientos | pág. 7 |
| Figura 4.Imagen multiespectral obtenida..... | pág. 10 |
| Figura 5.Divisiones de las parcelas | pág. 10 |
| Figura 6.Spectralon y teflón el día del vuelo..... | pág. 10 |
| Figura 7.Aspecto de una división parcelaria | pág. 11 |
| Figura 8.Aspecto cultivo de trigo día de vuelo | pág. 11 |
| Figura 9.Firmas espectrales de las distintas cubiertas | pág. 12 |
| Figura 10.Orden de cosecha de las parcelas de maíz..... | pág. 13 |
| Figura 11.Cosechadora y aspecto del cultivo de trigo día de cosecha..... | pág. 14 |
| Figura 12.Fallos en la plantación y pasillos | pág. 14 |
| Figura 13.Hueco de cilindro de toma de gases..... | pág. 14 |
| Figura 14.Aspecto cultivo de trigo día de cosecha | pág. 14 |
| Figura 15.Metodología realizada para la obtención de variables | pág. 14 |
| Figura 16.Pesaje de producción obtenida por parcela | pág. 15 |
| Figura 17.Limpieza y criba de una parte de la producción obtenida por parcela..... | pág. 15 |
| Figura 18. Obtención de humedad de la cosecha y peso hectolitro con PM-600 (Keller)..... | pág. 16 |
| Figura 19.Conteo 250 granos | pág. 16 |
| Figura 20.Pesaje de parte del grano para su secado..... | pág. 16 |
| Figura 21.Peso de 250 granos de trigo | pág. 16 |
| Figura 22.Distribución espacial del índice de vegetación RVI en el área de estudio | pág. 19 |
| Figura 23.Distribución espacial del índice de vegetación NDVI en el área de estudio | pág. 19 |
| Figura 24.Distribución espacial del índice de vegetación GNDVI en el área de estudio | pág. 20 |
| Figura 25.Distribución espacial del índice de vegetación NDRE en el área de estudio | pág. 20 |
| Figura 26.Distribución espacial del índice de vegetación CP1 en el área de estudio | pág. 21 |
| Figura 27.Polígonos de extracción de información empleando la metodo- logía 1 | pág. 22 |
| Figura 28. Polígonos de extracción de información empleando la meto- dología 2 | pág. 23 |
| Figura 29. Polígonos de extracción de información empleando la meto- dología 3 | pág. 23 |
| Figura 30.Análisis de correlación de los índices de vegetación | pág. 25 |
| Figura 31.Producción de grano por tratamientos..... | pág. 26 |
| Figura 32.Regresión lineal entre los tratamientos aplicados y los índices NDVI y RVI..... | pág. 28 |
| Figura 33.Relaciones de aquellos índices que han mostrado un mayor valor con las variables agronómicas..... | pág. 30 |

Índice Tablas

| | |
|--|---------|
| Tabla 1.Etapas de la Agricultura de precisión | pág. 2 |
| Tabla 2.Estadios del trigo | pág. 6 |
| Tabla 3.Dosis de Nitrógeno aplicada en cada parcela | pág. 8 |
| Tabla 4.Correspondencia cubiertas-valores máximos y mínimos de las bandas realizadas..... | pág. 11 |
| Tabla 5.Valores de las cubiertas por bandas..... | pág. 11 |
| Tabla 6.Índices de vegetación aplicados | pág. 17 |
| Tabla 7.Valores de producción por tratamientos | pág. 27 |
| Tabla 8.Valores de R ² en la relación del abonado con los neocanales..... | pág. 28 |
| Tabla 9.Valores de R ² en la relación de los neocanales con las variables agronómicas | pág. 29 |

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura ha tomado siempre mucha importancia en el ámbito económico y social de un país debido a que como decía Hervieu (1996) "se diga lo que se diga, y se haga lo que se haga, la agricultura sigue siendo un pivote del desarrollo de la ordenación rural" debido a que gracias a la misma la alimentación de la población se ha sustentado desde los inicios.

La conciencia de la agricultura, como base de autoabastecimiento, ha desaparecido en una gran parte del territorio pasando a ser una agricultura intensiva intentando obtener la mayor cantidad de producción del cultivo.

En España, el paso del tiempo también ha afectado considerablemente al número de explotaciones, al igual que a la Superficie Agrícola Utilizada (S.A.U). El número de explotaciones ha disminuido de 1.864.456 en 1999 a 967.293 en el año 2009. Esto también ha ocurrido con la S.A.U pasando de 42.180.951 ha a 30.527.049 ha en el mismo periodo. Las comunidades con una mayor extensión de explotaciones, en el año 2009, son Andalucía (242.488), Castilla La Mancha (120.744) y la Comunidad Valenciana (119.612) (INE, 2016).

En cuanto al tema medioambiental, siempre ha habido una relación entre la agricultura y la contaminación debido al mal uso de fertilizantes y de diferentes insumos industriales siendo la misma una de las causas que en la actualidad se intenta disminuir e incluso eliminar.

A lo anterior hay que añadir que la utilización de insumos industriales produce un aumento de la productividad al ofrecer una mayor cantidad de nutrientes a la tierra y al cultivo o al ayudar contra la aparición de plagas o malas hierbas. También se puede dar el caso contrario al esperado, es decir, que por exceder la cantidad de los mismos el cultivo no mejore, o que incluso le afecte negativamente (Bergh, et al. 2000).

El espacio físico siempre ha presentado una variabilidad, en cuanto a características y propiedades se refiere. La variabilidad que se genera puede ser de diversa índole (Leiva, Ph. D. 2003):

- Variabilidad natural: son aquellos procesos correspondientes a la propia naturaleza. Estos pueden ser el clima, tipo de suelo, topografía y especies vegetales y animales.
- Variabilidad inducida: aquella producida por la actividad del hombre, como puede ser la distinta compactación del suelo.
- Variabilidad espacial: es aquella que se encuentra dentro de una parcela, e incluso dentro de una pequeña porción, la cual puede ser proporcionada por el contenido de nutrientes.
- Variabilidad temporal: es aquella que puede afectar considerablemente a la producción siendo producida, por ejemplo, por la humedad del suelo.

Esto se ha traducido en una variabilidad de rendimiento que en el pasado se paliaba con la utilización de fertilizantes y herbicidas sin establecer una aplicación controlada de los mismos. Por tanto al encontrar una mayor cantidad de explotaciones intensivas, y a la necesidad y ambición de realizar mejoras medioambientales se produce una inserción de la Teledetección y de los Sistemas de Información Geográfica en la labor agrícola.

De este modo, la utilización de distintos insumos industriales es utilizada en la actualidad en conjunto con la Teledetección y SIG para obtener una mayor productividad (Ginestet, 2013), realizar un seguimiento del cultivo (Calera et al. 1999), control de plaga (Fernández-Quintanilla, 2013) o para tener un mayor control de los cultivos y estar más informados de su estado. A este conjunto de herramientas y procesos se les denomina Agricultura de Precisión (AP), cuyo surgimiento se produce en los años 80, la cual fue auspiciada por la existencia de la utilización de los satélites y vehículos aerotransportados, favoreciendo el cambio en la agricultura.

1.1. La agricultura de precisión

La AP son una serie de herramientas que mediante distintos grupos de tecnologías, entre ellas la satelital o aeroportada, permiten un distinto tratamiento espacial de insumos agrícolas, como los fertilizantes, semillas, plaguicidas, etc. dependiendo de las propiedades y necesidades zonales del cultivo.

La AP permite conocer las condiciones en las que se encuentran los cultivos, por lo cual se puede aumentar la eficiencia y controlar el impacto ambiental reduciendo los daños producidos, en el mejor de los casos. Por esto, se fija especial atención al medio ambiente y a las políticas agrarias de desarrollo sustentable como variables fundamentales (Matías, 2010).

La AP ha evolucionado a lo largo del tiempo apareciendo distintas etapas (Ortega y Flores, 1998) (Tabla 1).

Tabla 1. Etapas de la agricultura de precisión

| ETAPA | TECNOLOGÍA INVOLUCRADA | ACTIVIDADES |
|---|--|---|
| Recolección e ingreso de datos. | Sistemas de posicionamiento (GPS). Sistemas de información geográfica (SIG). Instrumentos topográficos. Sensores remotos. Sensores directos. | Medición de la topografía del suelo. Muestreo de suelos en cuadrícula. Recorrido de los cultivos para la detección de plagas y enfermedades. Monitoreo de rendimientos. Medición directa de propiedades del suelo y cultivos. Digitalización de mapas. |
| Análisis, procesamiento e interpretación de la información. | Programas de SIG. Sistemas expertos. Programas estadísticos. Experiencia del operador. | Ánalysis de dependencia espacial. Confección de mapas de evaluación. Confección de mapas de prescripción. Otras. |
| Aplicación diferencial de insumos. | Tecnología de dosis variables. Pulverización asistida por GPS. Programas computacionales. | Aplicación variable de nutrientes y plaguicidas. Siembra diferencial de variedades y aplicación variable de semillas. Otros. |

En las últimas dos décadas se ha producido una revolución interna en el desarrollo e implantación de estas tecnologías. Esta implantación ha ido encaminada siempre a obtener un mejor resultado de producción para así obtener una mayor rentabilidad del cultivo y disminuir el coste de la explotación. Esta es rentable de realizar siempre y cuando la maximización del beneficio sea superior a los gastos que se generan de su implantación.

La AP engloba una serie de prácticas como pueden ser la utilización de sembradora de precisión, la aplicación de distintos niveles de nitrógeno en una misma parcela, el empleo de herbicidas y pesticidas dependiendo de sus necesidades o incluso uso de una dosis de semilla u otra en función del suelo.

Una de las actividades más comunes es la Tecnología de Dosis Variables (TDV): esta es la aplicación variable de fertilizantes atendiendo a las diferencias de nivel de fertilidad de cada una de las divisiones realizadas siguiendo diferentes criterios. La detección de la variabilidad en el espacio va a depender, en una gran cantidad, de la resolución que presente la imagen obtenida, es decir del tamaño del píxel.

Como se ha indicado anteriormente, la AP siempre ha ido encaminada a la obtención de un mejor resultado. Para lograr esto y obtener una predicción de la cosecha lo más común es el uso de la teledetección y de imágenes multiespectrales para conseguir la variabilidad espacio-temporal necesaria de las explotaciones.

En España la AP se ha implantado en aquellos terrenos con cultivos que presentan una alta rentabilidad por ejemplo, el algodón o la remolacha. Uno de los problemas que se presentan es que hay una gran cantidad de parcelas con un tamaño reducido y por lo cual no presentaría una rentabilidad a los propietarios pero, en contraposición, España es uno de los países que presentan una mayor cantidad de explotaciones con más de 500 hectáreas como ocurre con las provincias de Extremadura, Andalucía o Aragón por lo que su uso irá aumentando en el futuro extendiéndose así por estas zonas.

1.2. La teledetección en las aplicaciones de la agricultura de precisión

Según Mather (2004), la teledetección aplicada a la observación de la Tierra es la interpretación y comprensión de medidas realizadas por instrumentos remotos de la radiación electromagnética reflejada desde o emitida por objetos en las superficies terrestres, oceánicas o glaciares de la tierra o de la propia atmósfera. La teledetección no solo es la toma de datos, sino que también recoge el proceso de tratamiento e interpretación (Chuvieco, 2008).

Hay distintos tipos de sensores, los pasivos que engloban las cámaras fotográficas y los radiómetros y los sensores activos. Los sensores pasivos son aquellos que reciben la energía reflejada del sol mientras que los sensores activos son aquellos sensores que emiten su propia energía y que la reciben más tarde ya modificada.

Los satélites más utilizados generalmente han sido los Landsat. El programa Landsat fue diseñado a finales de los años 60, es el programa más fructífero hasta el momento por la resolución que presenta, su carácter global, el periodo de observaciones y su comercialización. En cambio, en la actualidad se ha comenzado a utilizar mucho el satélite Sentinel 2A atendiendo a la mejora de sus aportaciones.

Landsat 1,2 y 3 presentaban un periodo orbital de 103 minutos y una revisita de 18 días, Landsat 4, 5 y 7 un periodo orbital de 98.9 minutos y una revisita de 16 días, al igual que Landsat 8. Sentinel 2A en cambio presenta una revisita de 10 días, lo cual muestra el avance generado en este ámbito.

La resolución espacial de los satélites Landsat es de 30 metros en las bandas del espectro visible con 6 bandas del registro multiespectral distribuidas entre el visible y el infrarrojo de onda corta. En Sentinel 2A presenta una resolución espacial de 10 y 20 metros, dependiendo de la banda. Se barajan por tanto nuevas técnicas debido a que no presenta una resolución espacial ajustada, a que su resolución temporal es elevada y puede no ser la correcta y a que no se puede obtener información cuando uno desee. A esto se le añade que puede haber presencia de nubes en la zona de estudio dificultando así la elaboración de distintos estudios que necesitan una mayor exactitud.

Debido a estas desventajas se comienzan a realizar vuelos aeroportados y comienzan a aplicarse en la AP los UAVs (Unmanned Aerial Vehicle), presentando así una menor resolución espectral y temporal. Este último tiene que ajustarse a la Ley 18/2014, de 15 de octubre por la que se aprobaron medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia en la que se regula el uso de la utilización de los mismos. Estos vehículos aeroportados presentan resoluciones espaciales por debajo del metro y puede obtenerse imágenes siempre que se desee, siempre y cuando el día no presente nubes o un viento alto que dificulte la toma de datos.

En el caso de la estimación de cosecha se utilizan sensores radiométricos y la misma se obtiene mediante la utilización de fórmulas que combinan bandas espectrales de la región visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Para obtener esta predicción primeramente se tiene que generar una imagen del estadio correcto del cultivo.

El periodo óptimo para la obtención de la imagen varía entre unos investigadores u otros. El periodo estaría entre los dos meses y medio antes de su cosecha y un mes y medio (Riva et al. 2011) y

otros autores han analizado que el mejor momento es 40/50 días antes de la cosecha, es decir en el inicio del estadio de antesis, en el caso de los cereales de invierno (Ginestet. 2013). Este plazo de días debe de ser ajustado realizándose un análisis de una serie larga de años para poder cuantificar como afecta a su mayor respuesta.

Una vez se obtiene la imagen existen distintos métodos de estimación de producción de los cuales dos son los más importantes:

- Modelo de estimación de biomasa de Monteith (1972,1977): este método consiste en que complementado con un índice de cosecha se permite determinar la biomasa acumulada de radiación fotosintéticamente activa absorbida en el periodo que se establezca y la cantidad de biomasa que se puede proveer por PAR absorbida.
- Modelos empíricos: estos modelos son variados pero siempre consisten en establecer relaciones entre un índice y la producción, u otra variable de estudio, para obtener una relación lineal, exponencial, logarítmica, etc.

Los índices que se utilizan para la predicción van desde el uso del NDVI, el cual es el más común, el uso del LAI (Doraismamy, 2004) o la utilización de índices relacionando la banda del verde, la cual puede mostrar una buena estimación (Moreno-García. et al, 2013).

La utilización del índice NDVI está muy extendida aunque no mide directamente la productividad ni la disponibilidad forrajera pero presenta una estrecha relación entre las mismas (Ginestet,P. 2013).

En general se realiza una relación entre distintos índices y la productividad de un año anterior o del mismo obteniéndose una relación lineal en algunos casos (Aparicio et al. 2000 y Ma et al. 2001) o exponencial en otros (Rivas et al.2011).

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1. Objetivos generales

La hipótesis de partida de este proyecto es que existe una relación entre los neocanales y las variables agronómicas. En base a ella, se ha definido el objetivo principal de este trabajo: estimar la producción de trigo y demás variables agronómicas a partir de informaciónpectral obtenida mediante UAV (Unmanned Aerial Vehicle) en una parcela experimental.

2.2. Objetivos específicos

Con los objetivos generales se establecen tres subobjetivos específicos:

1. Analizar las diferencias que se establecen entre las parcelas experimentales atendiendo a los tratamientos de abonados aplicados en distintos momentos de la fase vegetativa del cultivo de trigo.
2. Identificar la mejor metodología de extracción de datos, considerando como la mejor aquella que evita los problemas de la cosecha y refleja más correctamente la relación entre los neocanales y las distintas variables agronómicas .
3. Identificar los mejores neocanales para la estimación de las variables agronómicas.

Todo lo anteriormente nombrado irá acompañado de la metodología aplicada así como de la cartografía representativa que muestre los neocanales, localización de la parcela de estudio y representación de las variables obtenidas para así ofrecer una visión más completa y espacial del proyecto y de los objetivos generales específicos a cumplir.

Estos objetivos se han desarrollado en el contexto de unas prácticas enmarcadas dentro de la empresa SONEA Ingeniería y Medio Ambiente, la cual posee un convenio de colaboración con el CITA y el proyecto de I+D+i (proyecto INNOVA) en el que participa el grupo RAMA (CITA+AulaDei-

CSIC). El título del proyecto es “Desarrollo de productos y servicios derivados de teledetección aérea para mejorar la gestión agrícola”, cuya identificación es INNOVA-AI-077/15.

De este proyecto una de las líneas de trabajo corresponde con el trigo, el cual está enmarcado en el ensayo CITA-LABINH (INIA RTA20130-0057-C04 CITA-CTA) “Prácticas de manejo agrícola y de la fertilización orgánica en la dinámica del nitrógeno en cultivos de cereal: Aspectos agronómicos y ambientales”. Estas prácticas se han desarrollado principalmente en la empresa SONEA en la que se realizaron los procesos y cálculos del proyecto en la misma. También se han realizado prácticas en el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón en el que se ha continuado con el proyecto.

3. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio en la que se desarrolla el ensayo y de la que se realizan los diferentes análisis y caracterizaciones corresponde a una parcela localizada en la entidad municipal zaragozana de Montañaña, en la finca experimental de Soto Lezcano, la cual corresponde al dominio del CITA (Figura 1).

Este término se encuentra en las proximidades del río Gállego, situándose en el margen izquierdo del mismo en su descenso y ya cercano a su desembocadura en el río Ebro, en el municipio de Zaragoza.

Este terreno presenta una superficie de 1.28 ha, pero de esta exactamente se realiza el ensayo en una superficie de 0.26 ha.

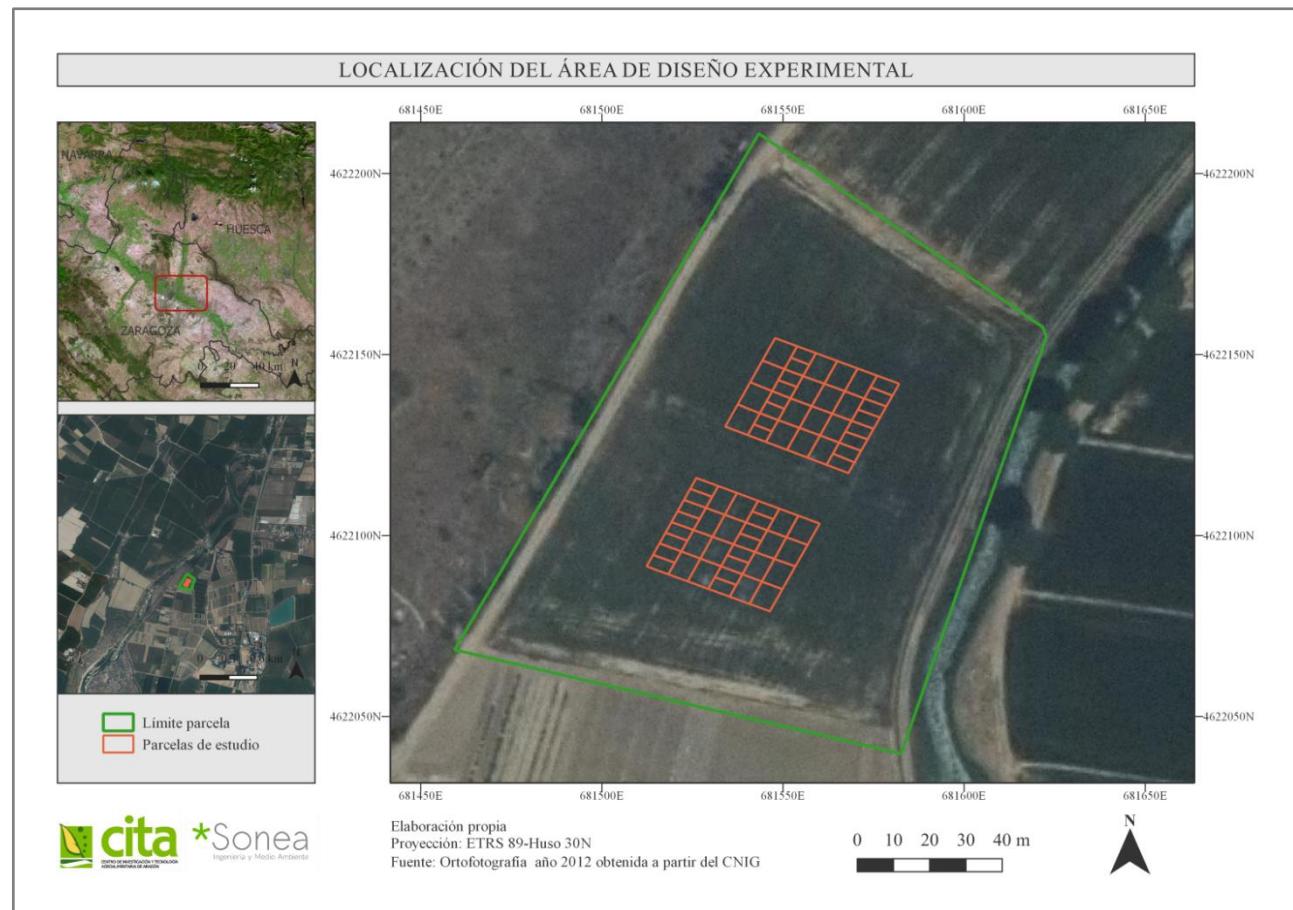


Figura 1. Área de estudio

Estas parcelas presentan trigo blando de variedad Rimbaud, por lo que estamos ante un cultivo de invierno, el cual fue sembrado el 26 de noviembre de 2015.

El trigo blando es una planta monocotiledónea perteneciente a la familia de las gramíneas (Pérez, 2016) y es necesario conocer la fenología del mismo para así poder saber cómo se comporta y establecer el mejor momento para su estudio y análisis posterior. Según Zadoks et al (1964) los estadios principales de este cultivo son los siguientes:

Tabla 2. Estadios del trigo

| FASES | ESTADIOS PRINCIPALES |
|---------------------------------|--|
| Fase Vegetativa | 0= Germinación |
| | 1= Crecimiento de plántula (*) |
| | 2= Ahijado (**) |
| Fase reproductiva | 3= Elongación del tallo o Encañado |
| | 4= Vaina engrosada (Formación inicial de inflorescencia) |
| | 5= Emergencia de Inflorescencia |
| | 6= Antesis |
| Fase de llenado de grano | 7= Desarrollo de grano lechoso |
| | 8= Desarrollo de grano pastoso |
| | 9= Madurez fisiológica |
| | 10= Estado de cosecha |

* Indica entre 11 y 19 hojas expandidas en el macollo principal.

**Indica entre 18 y 30 macollos principales por planta.

En el caso del trigo blando la siembra se realiza en los meses de octubre-noviembre y la recogida en los meses de junio-julio, en el caso de una siembra de ciclo corto se siembra en los meses de diciembre-enero.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este apartado se describen los distintos aspectos del diseño experimental relativos a los tratamientos aplicados al cultivo, la realización del vuelo multiespectral con UAV y el trabajo de campo para la obtención de variables. Todo este diseño sigue una línea cronológica fijada que muestra la Figura 2.

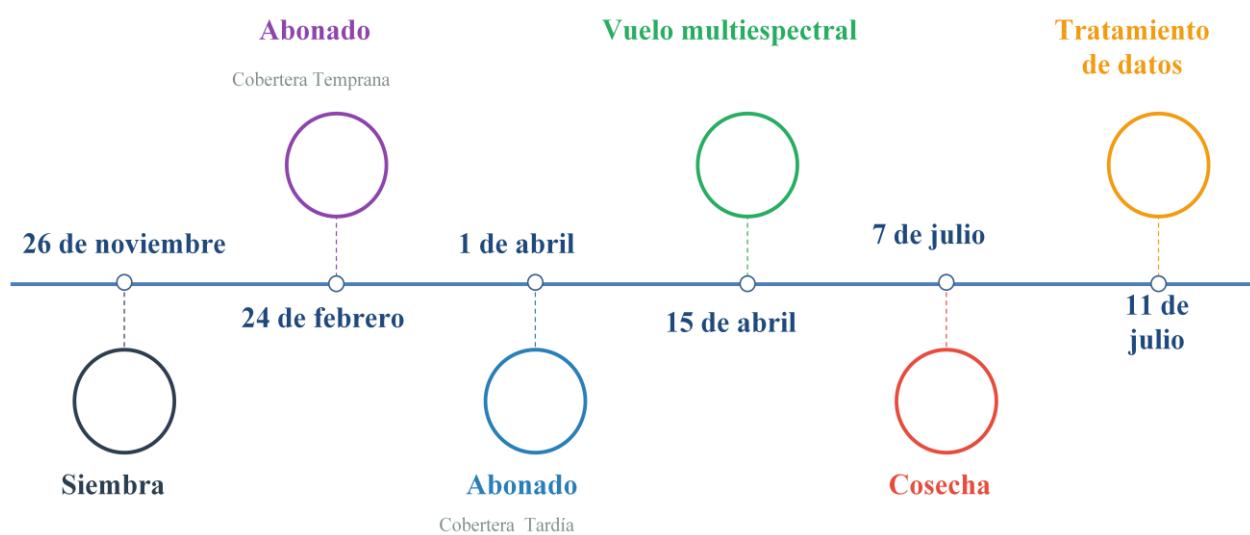


Figura 2. Esquema cronológico

4.1. Tratamientos de fertilización aplicados al cultivo

El ensayo cuenta con 64 parcelas experimentales. Estas parcelas presentan distintos tratamientos (cobertera temprana y cobertura tardía). En cuanto a la cobertura temprana se realizan tres tratamientos diferentes de fertilización aplicados a la salida del invierno (24 de febrero). Estos son los siguientes:

- Nitrógeno mineral (M): dosis teórica de 120Kg N/ha de urea.
- Purín Porcino (P): dosis teórica de purín de porcino de cebo a 120Kg N/ha.
- Purín + Inhibidor (PI): dosis teórica de purín de porcino de cebo a 120Kg N/ha + Inhibidor de la urea.

El inhibidor de ureasa es utilizado para la prevención o disminución, durante un periodo de tiempo, de la pérdida de nutrientes del suelo y las plantas.

En la cobertura tardía, realizada el 1 de Abril de 2016 en el inicio del encañado se aplicaron cuatro dosis diferentes de nitrógeno mineral en el inicio del encañado: 0, 30, 60 y 90 Kg N/ha. Se han realizado cuatro repeticiones en las parcelas dividiéndolas en Bloque 1, 2, 3 y 4. En cada repetición hay tres bandas, correspondientes a nitrógeno mineral, purín porcino y purín porcino + inhibidor. En las bandas de nitrógeno mineral se ha incluido un control sin aplicación de N y cuatro tratamientos de N en salida de invierno a dosis de 60, 90, 120 y 150Kg N/ha (urea).

Las parcelas de estudio presentan un tamaño teórico de 3.5 metros de longitud en las parcelas de abonado M y de 7 metros en las de abonado P y PI.

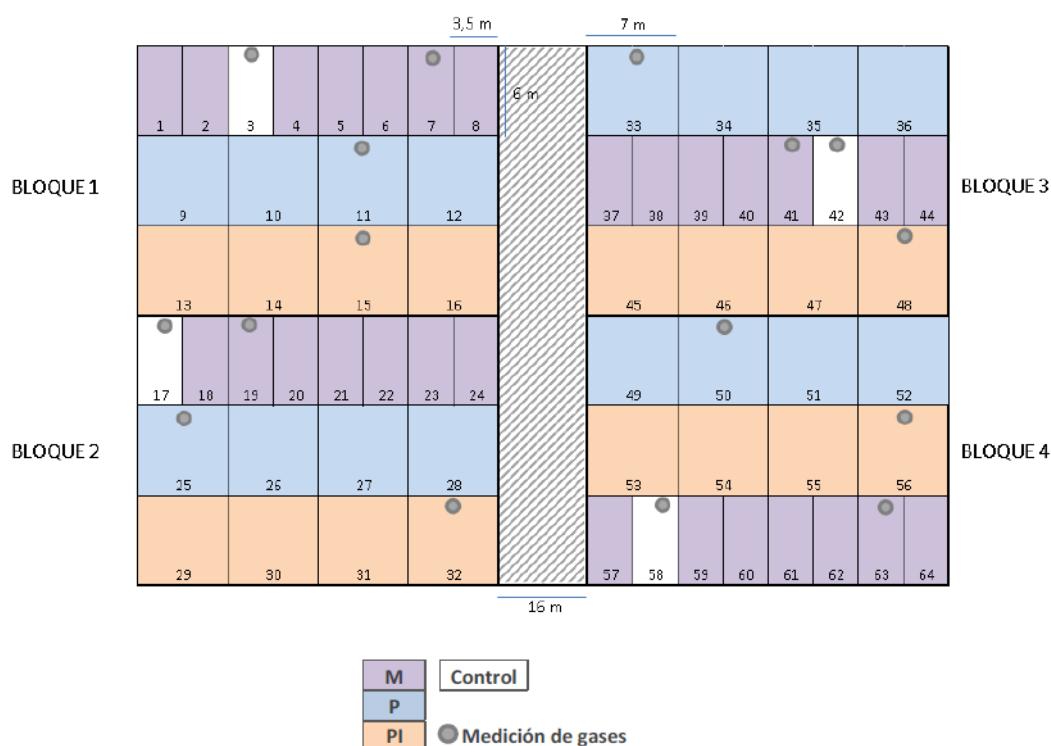


Figura 3. Localización de las parcelas por tratamientos.

En la Figura 3 se muestra la distribución de las parcelas, su localización por tratamientos y se marcan aquellas parcelas en las que se encuentran cilindros para la medición de gases de efecto invernadero. Estos cilindros corresponden a otro proyecto del CITA que se desarrolla en el mismo terreno. Se incluyen en esta figura porque, como se verá en apartados subsiguientes, suponen afección para el desarrollo de esta investigación. Las cantidades de N aplicadas en cada una de las parcelas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Dosis de Nitrógeno aplicadas en cada parcela

| NºPar c | Blo- que | Código | Cobertera | | | Nº Parc | Blo- que | Código | Cobertera | | |
|------------|-------------|-------------|-----------|------------------|------------------|------------|-------------|-------------|-----------|------------------|------------------|
| | | | Temprana | | Tardía | | | | Temprana | | Tardía |
| | | | Ti- po | Dosis (Kg/ha) | Dosis (Kg/ha) | | | | Tipo | Dosis (Kg/ha) | Dosis (Kg/ha) |
| 1 | 1 | N60N0 | M | 60 | 0 | 33 | 3 | PN30 | P | 103 | 30 |
| 2 | 1 | N120N6 0 | M | 120 | 60 | 34 | 3 | PN0 | P | 103 | 0 |
| 3 | 1 | Control | M | 0 | 0 | 35 | 3 | PN90 | P | 103 | 90 |
| 4 | 1 | N90N0 | M | 90 | 0 | 36 | 3 | PN60 | P | 103 | 60 |
| 5 | 1 | N150N0 | M | 150 | 0 | 37 | 3 | N120N9 0 | M | 120 | 90 |
| 6 | 1 | N120N9 0 | M | 120 | 90 | 38 | 3 | N120N6 0 | M | 120 | 60 |
| 7 | 1 | N120N3 0 | M | 120 | 30 | 39 | 3 | N60N0 | M | 60 | 0 |
| 8 | 1 | N120N0 | M | 120 | 0 | 40 | 3 | N150N0 | M | 150 | 0 |
| 9 | 1 | PN0 | P | 103 | 0 | 41 | 3 | N120N3 0 | M | 120 | 30 |
| 10 | 1 | PN60 | P | 103 | 60 | 42 | 3 | Control | M | 0 | 0 |
| 11 | 1 | PN30 | P | 103 | 30 | 43 | 3 | N90N0 | M | 90 | 0 |
| 12 | 1 | PN90 | P | 103 | 90 | 44 | 3 | N120N0 | M | 120 | 0 |
| 13 | 1 | PIN60 | PI | 91 | 60 | 45 | 3 | PIN0 | PI | 91 | 0 |
| 14 | 1 | P1N90 | PI | 91 | 90 | 46 | 3 | P1N60 | PI | 91 | 60 |
| 15 | 1 | PIN30 | PI | 91 | 30 | 47 | 3 | PIN90 | PI | 91 | 90 |
| 16 | 1 | PIN0 | PI | 91 | 0 | 48 | 3 | PIN30 | PI | 91 | 30 |
| 17 | 2 | Control | M | 0 | 0 | 49 | 4 | PN60 | P | 118 | 60 |
| 18 | 2 | N120N6 0 | M | 120 | 60 | 50 | 4 | PN30 | P | 118 | 30 |
| 19 | 2 | N120N3 0 | M | 120 | 30 | 51 | 4 | PN90 | P | 118 | 90 |
| 20 | 2 | N150N0 | M | 150 | 0 | 52 | 4 | PN0 | P | 118 | 0 |
| 21 | 2 | N120N0 | M | 120 | 0 | 53 | 4 | PIN0 | PI | 143 | 0 |
| 22 | 2 | N900 | M | 90 | 0 | 54 | 4 | P1N90 | PI | 143 | 90 |
| 23 | 2 | N60N0 | M | 60 | 0 | 55 | 4 | PIN60 | PI | 143 | 60 |
| 24 | 2 | N120N9 0 | M | 120 | 90 | 56 | 4 | PIN30 | PI | 143 | 30 |
| 25 | 2 | PN30 | P | 118 | 30 | 57 | 4 | N120N0 | M | 120 | 0 |
| 26 | 2 | PN60 | P | 118 | 60 | 58 | 4 | Control | M | 0 | 0 |
| 27 | 2 | PN0 | P | 118 | 0 | 59 | 4 | N120N9 0 | M | 120 | 90 |
| 28 | 2 | PN90 | P | 118 | 90 | 60 | 4 | N60N0 | M | 60 | 0 |
| 29 | 2 | PIN60 | PI | 143 | 60 | 61 | 4 | N90N0 | M | 90 | 0 |
| 30 | 2 | P1N0 | PI | 143 | 0 | 62 | 4 | N120N6 | M | 120 | 60 |
| 31 | 2 | PIN90 | PI | 143 | 90 | 63 | 4 | N120N3 0 | M | 120 | 30 |
| 32 | 2 | PIN30 | PI | 143 | 30 | 64 | 4 | N150N0 | M | 150 | 0 |

Las cantidades de N que se aplicaron con el purín (parcelas P y PI) oscilaron entre 91 y 143 kg N/ha bastante cercanas a las dosis teóricas establecidas de 120 kg N/ha.

4.2. Vuelo UAV : características de la imagen multiespectral

El UAV que se utilizó para la realización del vuelo es de ala fija, con un peso de 0.71Kg, una envergadura de 96 cm, una propulsión eléctrica con hélice impulsada, motor DC sin escobillas y 160 W y con una batería de 11.1V, 2150 mAh.

Las operaciones presentan un tiempo máximo de vuelo de 45 minutos, una velocidad de crucero nominal de 11-25 m/s, puede realizar una cobertura máxima en un vuelo de 1000 ha, resiste a vientos máximos de 45 Km/h, tiene una precisión vertical de 4cm-7cm con W/GCPS y una precisión vertical de 1-5 metros sin GCPS.

El sensor presenta cuatro bandas con sensores de 1.2 M.P y una resolución espacial de 10 centímetros por píxel. Las bandas utilizadas son:

- Green (530 – 570 nm): centro en 550nm.
- Red (630 – 670 nm): centro en 660nm.
- Red Edge (720 – 740 nm): centro en 735nm.
- NIR (770 – 810 nm): centro en 790nm.

La banda Red Edge tiene la finalidad de captar la reflectividad de la vegetación. Se encuentra entre el mínimo del rojo, asociado a la absorción de la clorofila, y la máxima respuesta que se encuentra en el infrarrojo cercano y así se puede obtener información de las dos bandas en una.

El vuelo generado se realizó a una altura de entre 95 y 97 metros. Las imágenes obtenidas presentan un solape en la latitud del 80% y de un 65% en la longitud. Se tomaron con 7° de inclinación y las velocidades a las que fueron tomadas son de entre 2.71 y 3.5 m/s dependiendo del viento incidente en cada momento sobre el UAV. En el momento del vuelo se colocaron en la parcela un Spectralon y un teflón para obtener el valor de referencia de los mismos en la imagen y así poder evaluar el estado de la imagen con mayor detalle al añadirse un fotómetro durante el vuelo que ayuda a la toma de la imagen.

La temperatura media que se produjo ese día fue de 18.4°C, llegando a 26.8°C a las 17:30 como temperatura máxima y de 10.1°C a las 00:00, como mínima. En cuanto a la velocidad en el momento del vuelo fue de 10km/h por lo cual el viento no afecta negativamente a la toma de las imágenes.

El día del vuelo se manifestó con nubes dispersas. Según la empresa proveedora de la imagen pudo producirse durante el vuelo algún episodio, aunque mínimo, en los que el aporte de luz se vio alterado debido a esta presencia de nubes. Esta información se considera relevante para el análisis del comportamiento espectral de la imagen obtenida descrito a continuación.



Figura 4. Imagen multiespectral obtenida

En las siguientes figuras (5 a 8) se muestran fotografías que reflejan el aspecto del cultivo de trigo en el día de vuelo. En ellas se observan también los distintos accesorios (Spectralon y teflón) que formaron parte de la toma de datos durante el vuelo así como de las condiciones de iluminación en la fecha en la que se realizó.



Figura 5. Divisiones de las parcelas



Figura 6. Spectralon y teflón el día del vuelo

| | |
|---|--|
|  |  |
| Figura 7. Aspecto de una división parcelaria | Figura 8. Aspecto cultivo de trigo día de vuelo |

4.2.1. Comportamiento espectral de la imagen multiespectral

La imagen multiespectral ha sido proporcionada por la empresa que realizó el vuelo de UAV ya procesada, es decir, corregida geométricamente y con la información espectral en valores de reflectividad. La conversión de niveles digitales a valores de reflectividad se produjo siguiendo la metodología establecida para esta tecnología concreta: (i) se realiza una fotografía con el UAV a su placa de calibración, que va acompañado con un código QR que permite la lectura automática de sus valores de calibración y (ii) la relación entre los ND de la placa de calibración y sus valores de reflectividad en las cuatro bandas espectrales es utilizada para la conversión de los ND de todos los píxeles de la imagen.

La imagen que se obtiene del vuelo UAV presenta una resolución de 32 bits y posteriormente es transformada a valores de reflectividad de tantos por 1. Esta imagen presenta 1576370 píxeles en total.

Para conocer el comportamiento espectral de la imagen se analizan las respuestas espectrales de las cuatro principales cubiertas (trigo, suelo, pasillo y vegetación arbustiva). Con ello, como muestra la Tabla 4, se conoce en qué cubiertas se obtienen los valores de reflectividad mínimos y máximos en cada banda espectral.

Tabla 4. Correspondencia cubiertas-valores máximos y mínimos de las bandas

| | Valores Mínimos | Valores Máximos |
|-------------------------|-----------------|----------------------|
| Verde (550nm) | Trigo | Suelo |
| Rojo (660nm) | Trigo | Suelo |
| Red Edge (735nm) | Suelo | Vegetación arbustiva |
| NIR (790nm) | Suelo | Vegetación arbustiva |

Para ver mejor el comportamiento de las cuatro cubiertas se procede a la obtención de diez píxeles aleatorios de cada una de ellas y se realiza la media de sus respuestas espectrales en cada una de las cuatro bandas espectrales (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de las cubiertas por bandas

| | VERDE (550nm) | ROJO (660nm) | RED EDGE (735nm) | NIR(790nm) |
|-----------------------------|---------------|--------------|------------------|-------------|
| Mín-Máx | 0.024-0.486 | 0.010-0.490 | 0.032-0.602 | 0.048-0.752 |
| Suelo | 0.256 | 0.316 | 0.355 | 0.405 |
| Pasillo | 0.202 | 0.263 | 0.350 | 0.451 |
| Trigo | 0.032 | 0.015 | 0.246 | 0.565 |
| Vegetación arbustiva | 0.078 | 0.046 | 0.367 | 0.591 |

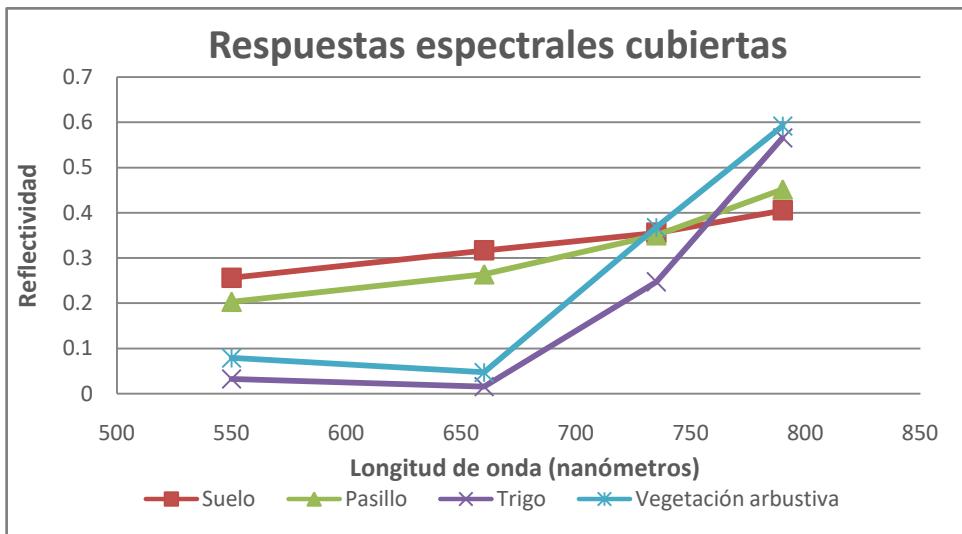


Figura 9. Firmas espectrales de las distintas cubiertas

Observando los datos de la Tabla 5 y la Figura 9 se visualiza que el suelo y el pasillo presentan unos valores normales en cuanto a firmapectral y que su reflectividad va en aumento según aumenta la longitud de onda llegando a 0.40-0.45nm en el NIR.

La respuesta espectral que muestra el trigo sí se corresponde con una firmapectral característica. Presenta una disminución de la reflectividad en el rojo frente al verde y un valor medio de 0.6 en el NIR. Se observa que los valores de reflectividad en las bandas del verde y rojo son de 0.03 en el verde y 0.01 en el rojo. Los valores mostrados en estas dos bandas son más bajos a los observados en otros estudios como el de Pérez (2016) en el que se registraron valores de 6% y 5% de reflectividad en el verde y el rojo, respectivamente.

Analizados los diferentes datos y valores que se obtienen en distintos estudios se llega a la conclusión de que las bandas de verde y del rojo presentan una infraestimación. Al no ser posible la aplicación de ningún proceso de corrección posterior que asegure la integridad de los datos, se asume un error de infraestimación en las dos bandas del visible.

4.3. Medición de variables biofísicas en campo

Se observa, en cuanto a la nascencia del trigo, que se han desarrollado filas en las que no ha nacido trigo, ya sea por fallo en la plantación de la semilla o por el propio nacimiento. Estos errores se consideran normales debido a que es común el suceso del mismo.

Estas dos características se toman en cuenta el día de la cosecha (7 de julio de 2016) realizada por el CITA y en la que se colaboró. En el transcurso de la cosecha se intentó no atravesar las zonas en las que se observaban fallos de nascencia para así no afectar a las comparaciones posteriores entre parcelas. La cosechadora atravesó, siempre lo mas rectamente posible, una anchura de 1.65 metros por la longitud real de cada una de las parcelas (3.5m y 7m teóricamente) obteniéndose superficies variables de 5.50m² y 11.00m² aproximadamente (Anejo 2). En la Figura 15 se muestra un esquema que reproduce el orden en el que se realizó la cosecha en las parcelas de trigo.

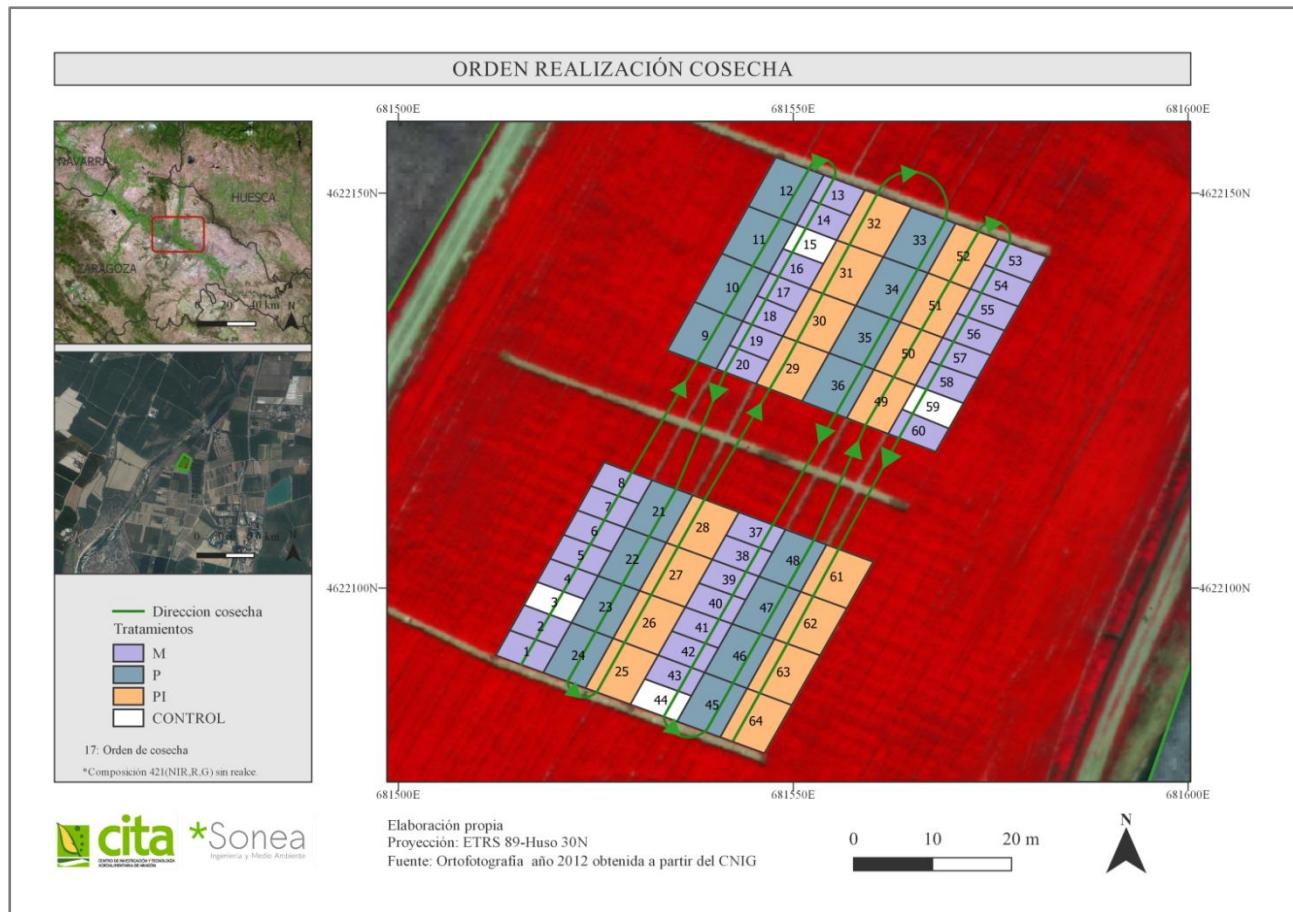


Figura 10. Orden de cosecha de las parcelas de trigo.

En el momento de la cosecha se observan una serie de características reseñables de algunas de las parcelas que afectarán en casos excepcionales a los resultados:

- Parcelas 10 y 11: presentan pequeños pasillos de los que uno es tomado en el momento de la cosecha, en pequeña proporción.
- Parcela 12: la parcela muestra un pequeño hueco de 5cm que es atravesado por la maquina, en pequeña medida la cual no afectará a la producción. Este fallo se encuentra justo al extremo de la parcela.
- Parcela 13: se cosecha con una distancia menor al borde para así no atravesar una línea de fallo.
- Parcelas 41 y 42: en el momento de la cosecha se ha tomado unos 15 cm x 5 cm de zona de fallo debido a que se encuentra un cilindro de toma de datos de gases (correspondiente a otra línea de investigación del CITA) en un lado y este no puede ser atravesado por la maquina cosechadora.
- Parcelas 43, 44, 54, 55 y 56: las parcelas muestran un pequeño pasillo de fallo, el cual es atravesado por la cosechadora.
- Parcelas 45, 46 y 47: estas parcelas en el momento de la cosecha presentan Avena Loca (*Avena fatua*). La presencia de la misma puede alterar el comportamiento espectral en estas parcelas. En la parcela 47 además se observa la existencia de mala hierba.
- Parcela 60: el suelo de esta parcela presenta, visualmente, una mayor humedad que las demás.
- Parcela 63: presenta un hueco lateral que es atravesado en unos 2 cm.

| | |
|--|---|
|  |  |
| Figura 11. Cosechadora y aspecto cultivo de trigo día de cosecha | Figura 12. Fallos en la plantación y pasillos |
|  |  |
| Figura 13. Hueco de cilindro de toma de gases | Figura 14. Aspecto cultivo de trigo día de cosecha |

Una vez cosechadas las parcelas, se muestrearon manualmente (control de biomasa) dos superficies regulares de 50 x 54 cm para obtener el índice de cosecha, o relación entre el grano y la biomasa total. El procedimiento seguido de la producción es el que se muestra en la Figura 15.

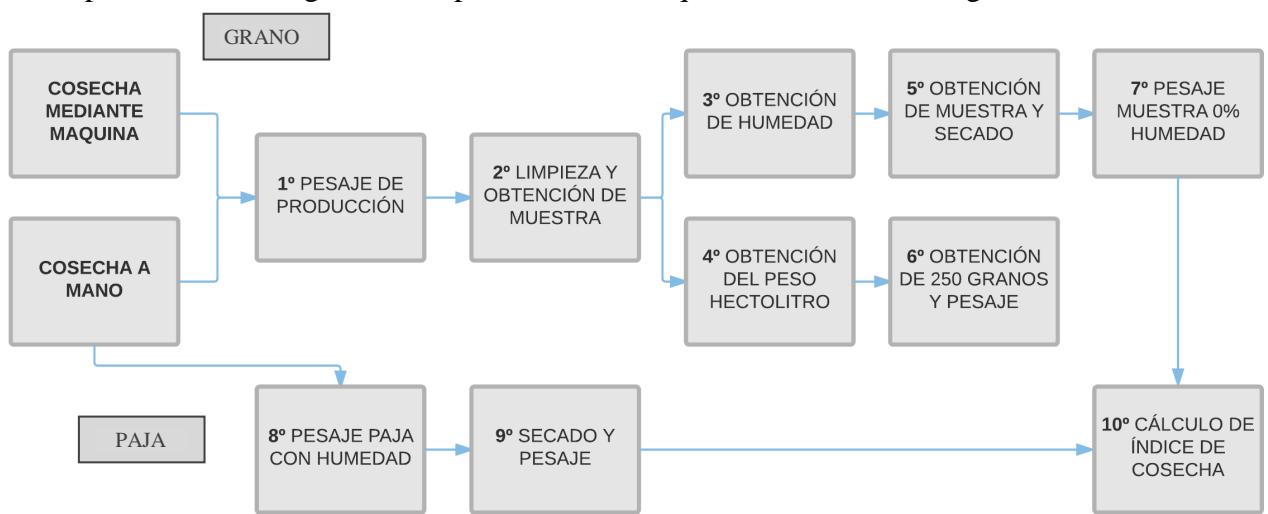


Figura 15. Metodología realizada para la obtención de variables.

El tratamiento del producto fue realizado por separado para cada una de las parcelas con objeto de poder establecer diferencias entre los mismos. A continuación, se detallan las variables que se han obtenido, las cinco primeras se han obtenido tanto en la cosecha por máquina como mediante los marcos y de la variable 6 a la 8 se han obtenido solo con la información de la cosecha manual. Los datos

fueron obtenidos y elaborados por el personal de la unidad de Suelos y Riesgos del CITA, y se colaboró en el desarrollo y medida de los mismos.

1. Producción de grano (Kg/ha): se pesaron los distintos sacos obtenidos, con la superficie cosechada y lo obtenido en ella se calcula el resultado por hectárea (Figura 16).
2. Producción de grano al 12% humedad (Kg/ha): se mide el porcentaje de humedad del grano con un medidor de humedad PM-600 (Keller, Japón) y se calcula la producción por hectárea a la humedad de referencia del 12% (Figura 17).
3. Producción de grano al 0% humedad (Kg/ha): el trigo se seca en una estufa a 50° C hasta peso estable y con el peso seco se obtiene la producción de grano seco (Figura 20).
4. Peso hectolitro (Kg/l): es la cantidad de granos que caben en un hectolitro y se mide al mismo tiempo que la humedad del grano (2) con el medidor de humedad PM-600 (Keller) (Figura 18).
5. Peso 1000 granos (g): obtenido de la limpieza de la producción primaria. Se han obtenido 250 granos mediante una máquina específica para ello, se ha pesado y obtenido el peso de 1000 granos (Figuras 19 y 21).
6. Producción de paja (Kg/ha): se pesa la paja obtenida en el cosechado manual, con humedad de campo, y se calcula la cantidad de una hectárea.
7. Producción de paja 0% de humedad (Kg/ha): la paja anterior se seca en estufa a 60°C y se calcula la producción de paja al 0% de humedad.
8. Índice de cosecha: es un índice que marca la cantidad de grano obtenido en relación a la biomasa aérea total (grano+paja) y se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Producción de grano (0\%)}}{\text{Producción de grano (0\%)} + \text{Producción paja 0\% humedad}}$$



Figura 16. Pesaje de producción obtenida por parcela



Figura 17. Limpieza y criba de una parte de la producción obtenida por parcela



Figura 18. Obtención de humedad de la cosecha y del peso hectolitro con PM-600 (Keller)



Figura 19. Conteo de 250 granos

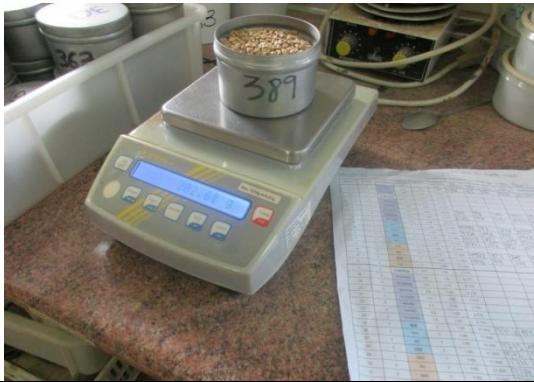


Figura 20. Pesaje de parte del grano para su secado



Figura 21. Peso de 250 granos de trigo

Estos datos se recogen todos en el Anexo 2 y posteriormente serán tratados para la utilización de los mismos como variables de estudio.

5. METODOLOGÍA

En este apartado se describen el conjunto de fases y procesos aplicados relativos a la generación de neocanales, la extracción de información mediante parcelaciones y el análisis estadístico de los valores obtenidos. Los programas informáticos utilizados en estos procesos son QGIS, Microsoft Excel y RStudio.

5.1. Generación de neocanales: índices de vegetación y análisis de componentes principales

Las características del trigo pueden ser mostradas mediante neocanales facilitando así su posterior análisis y relación con distintas variables agronómicas. Los neocanales permiten extraer información continua y realzan aspectos significativos de las imágenes de satélite; son, por tanto, muy útiles en el desarrollo de modelos empíricos de estimación de parámetros biofísicos. En este trabajo se han generado nuevas variables espetrales a partir de índices de vegetación y componentes.

5.1.1. Índices de vegetación

Los índices de vegetación según Gilabert et al. (1997) son un “parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas”.

Según Jackson et al. (1983) estos “deben de ser sensibles a la cubierta vegetal e insensible al brillo, al color del suelo, a la perturbación atmosférica y a las geometrías de iluminación y observación”.

Los índices de vegetación permiten diferenciar más concretamente entre las distintas cubiertas debido a que presentan un comportamiento reflectivo diferente. Estos índices consisten en la utilización de diferentes bandas, principalmente de las bandas rojo y NIR, y generar productos sumando, multiplicando o dividiendo estas bandas para obtener con ello un valor que marque el mayor o menor vigor o cantidad de vegetación. Los índices además reducen las distorsiones introducidas por el relieve en la geometría de la iluminación-observación.

Los índices han sido utilizados para cuestiones como la estimación del contenido de clorofila y agua, la estimación de biomasa, LAI, etc. Esto se fundamenta en que la radiación incidente en la región del NIR penetra hasta el mesófilo de la planta, donde es reflejada, mientras que en el rojo es en la cutícula donde es absorbida mayoritariamente.

No solo se realizan índices entre el rojo y el NIR sino que, también se utilizan las bandas del verde y el Red Edge pero siempre en conjunto con el NIR. Se pueden encontrar distintos tipos de índices según Alzate (1993), los que no tienen en cuenta la línea del suelo (intrínsecos o basados en la pendiente) y los que sí la consideran (extrínsecos o basados en la distancia). Todos los índices calculados en este trabajo pertenecen a la primera categoría.

Los índices basados en la pendiente son aquellos que usando un modo bi-espectral forman una línea que comienza en el origen, es decir, que cada línea muestra una distinta pendiente atendiendo a la combinación de distintos valores. Los índices utilizados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Índices de vegetación aplicados

| | FÓRMULA | AUTOR |
|--------------|-----------------------------------|------------------------|
| RVI | NIR/ROJO | Pearson y Miller. 1972 |
| NDVI | (NIR-ROJO)/ (NIR+ROJO) | Rouse et al. 1974 |
| GNDVI | (NIR-VERDE)/ (NIR+VERDE) | Kemerer. 2007 |
| NDRE | (NIR-RED EDGE)/ (NIR+RED EDGE) | Barnes et al. 2000 |

- **RVI (Ratio Vegetation Index)**

Este índice utiliza las bandas del rojo y del NIR mostrando el ratio que existe entre las dos bandas. La utilización de la banda roja es debido a que en esta se produce una baja reflectividad al producirse una absorción a cargo de la clorofila. En cambio en el infrarrojo cercano se produce una alta reflectividad debido a la estructura de la hoja cuando el estado fenológico es óptimo.

Muestra valores siempre mayores a 0 y varía atendiendo a la diferencia existente entre las bandas. Este índice es muy sensible a las propiedades ópticas de la tierra y muy poco sensible a las condiciones de iluminación. Los resultados de la espacialización de este índice en las parcelas de estudio se muestran en la Figura 22.

- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**

Es el índice de vegetación diferencial normalizado. Genera valores de -1 a 1 permitiendo la realización de umbrales observando que valores inferiores a 0.1 se corresponden a zonas arenosas, rocosas o incluso nieve y valores de 0.2-0.3 aproximadamente se corresponden a cubiertas de vegetación muy pobre mostrando así valores de vegetación cuando este valor es mayor al anterior. Este índice se basa en el comportamiento radiométrico de la planta dependiendo de la actividad fotosintética y la estructu-

ra foliar, mostrando así la vigorosidad. Por tanto, los valores de NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada en distintas longitudes de onda (Díaz, 2015).

Las ventajas de este índice son que es el índice más utilizado, es sencillo de implementar y reduce el efecto de la topografía mostrando así en valores negativos la ausencia de vegetación y la presencia de agua.

En cuanto a las desventajas de este índice son que es sensible a la reflectividad del suelo lo cual puede hacer que un píxel con vegetación muestre la reflectividad del suelo circundante. Esto es problemático cuando la cubierta vegetal es menor al 50%. Otro de los inconvenientes es que presenta problemas de saturación con un 60-70% de vegetación. Este hecho puede afectar a los resultados de este trabajo. Los resultados de la espacialización de este índice en las parcelas de estudio se muestran en la Figura 23.

- GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*)

Este índice se corresponde con una modificación del NDVI pero con la utilización de la banda del verde en vez de la banda del rojo. Ha expuesto una buena relación con el rendimiento por lo que, en principio, la banda del verde ofrece una buena información sobre esto (Moreno-García et al. 2013) debido a que esta banda muestra una mayor sensibilidad a la concentración de clorofila. Los resultados de la espacialización de este índice en las parcelas de estudio se muestran en la Figura 24.

- NDRE (*Normalized Difference Red Edge Index*)

Debido a que la cámara multiespectral que acompaña al UAV ofrece información de la banda del Red Edge se plantea la realización de un índice que pueda mostrar la información sobre el estado del cultivo para la posterior relación con la producción al mostrar esta banda unas características diferentes a las demás. El índice por el que es optado es el NDRE el cual es parecido al NDVI pero variando la banda del rojo por la banda del Red Edge.

El propósito es comprobar si este índice, al mostrar el contenido de clorofila del trigo de una forma más óptima, se relaciona mejor con la producción obtenida. Los resultados de la espacialización de este índice en las parcelas de estudio se muestran en la Figura 25.

5.1.2. Análisis de componentes principales

Es una técnica estadística entroncada en las técnicas multivariantes de síntesis de la información. El objetivo final de esta técnica es resumir la información de las bandas en unas nuevas variables sin llegar a perder la información importante y eliminando la información redundante (Chuvieco, 1996).

Estas nuevas variables son generadas a partir de la comprensión de las bandas y transformación de un espacio de representación P en un nuevo espacio P' en el que los datos no están correlacionados. Estos componentes se crean a partir de nuevos ejes en un espacio n-dimensional mediante la rotación y traslación de los ejes de las bandas originales.

De la realización de este proceso se genera como máximo el mismo número de componentes que de bandas. También se genera una matriz de varianza-covarianza mostrando los eigenvalores que marcan la cantidad de información que se recoge de cada banda en el nuevo componente y los eigenvectores que muestran la relación de los ejes con los originales mediante unos coeficientes que son los generadores de la ecuación creadora del componente. Normalmente el primer componente recoge las características espectrales comunes de la imagen, es decir, el brillo de cada píxel, el segundo de los componentes y los siguientes se interpretan mediante la matriz de autovectores. En el caso que nos ocupa, las estadísticas del análisis muestran que el primer componente principal recoge el 79,6% de la información original. Dadas las características de la imagen, con un dominio casi absoluto de la componente vegetal, se considera que este primer componente sintetiza la variable verdor del multibanda original. Los resultados de la espacialización de este componente en las parcelas de estudio se muestran en la Figura 26.



Figura 22. Distribución espacial del índice de vegetación RVI en el área de estudio.



Figura 23. Distribución espacial del índice de vegetación NDVI en el área de estudio.



Figura 24. Distribución espacial del índice de vegetación GNDVI en el área de estudio.



Figura 25. Distribución espacial del índice de vegetación NDRE en el área de estudio.

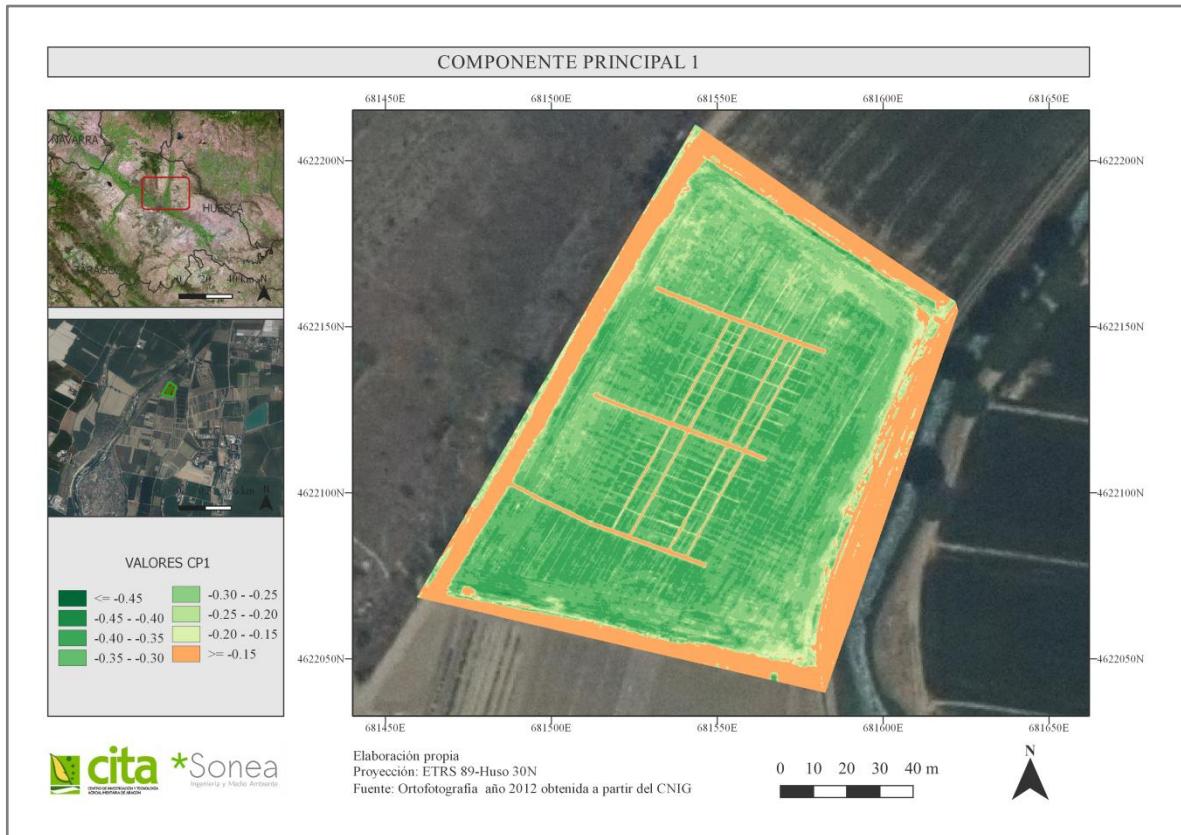


Figura 26. Distribución espacial del componente principal 1 en el área de estudio.

5.2. Extracción de estadísticas zonales

Este apartado describe los métodos seguidos para la extracción de la información contenida en los distintos índices agronómicos. Para ello, asociado a cada parcela de ensayo se crean polígonos mediante los que se obtendrá la información y que serán creados empleando distintas metodologías con el fin de intentar solventar algunos de los problemas observados en la imagen y en el campo.

Con las tres metodologías de parcelación se obtienen las estadísticas zonales básicas de cada una de ellas atendiendo a los distintos índices. Las estadísticas obtenidas son la media, desviación típica, valor mínimo y valor máximo. Se realiza la media de los valores de las parcelas que muestran un mismo tratamiento para así obtener un solo valor por abonado.

Metodología 1

En un comienzo se posee una parcelación que se corresponde con las dimensiones establecidas teóricamente, es decir 3.5m y 7m x 6m (Apartado 4). Estas parcelas contienen en su delimitación zonas correspondientes a pasillos realizados entre parcelas, píxeles mixtos en los bordes, trigo en buen estado y fallos en la plantación y nascencia.

Por esto, la primera metodología consiste en la realización de buffers a las parcelas para no incluir en las mismas los pasillos y eliminar el efecto de los píxeles mixtos. No se realiza el mismo buffer para todas las parcelas, sino que, a las parcelas con dimensiones de 3.5 metros se le aplica un buffer interior de 0.8 para que se elimine 80 cm a cada uno de los lados de estas parcelas sin perder una gran cantidad de píxeles y tener los suficientes para la realización de un análisis exhaustivo. En el caso de las parcelas de 7m se realiza un buffer interior de 1 metro. (Figura 27)

Metodología 2

Esta metodología se basa en la extracción de la información correspondiente al recorrido realizado por la máquina en el momento de la cosecha del trigo. El proceso de realización ha sido el de carto-

grafiar mediante una línea aproximada la zona de paso de la cosechadora por cada una de las parcelas en el momento de su realización y realizar un buffer de 0.825 para así obtener el ancho de pasada de la máquina (1.65m). Se realiza un buffer interior de 0.4m de la superficie cosechada por parcela para así eliminar la influencia de los píxeles mixtos. (Figura 28)

Metodología 3

La última de las metodologías consiste en la supresión de los fallos de plantación y nascencia. Para ello se han elaborado polígonos irregulares atendiendo a las zonas que se visualizan en la imagen multiespectral como zonas de fallo, ayudándonos del trabajo de campo realizado previamente. Estos polígonos se han realizado excediendo el tamaño original del fallo y así eliminar la influencia de los píxeles mixtos para el análisis posterior. (Figura 29)

Estos polígonos han sido transformados en una máscara para la eliminación de sus valores en las distintas capas de las que posteriormente se obtienen sus valores mediante la capa parcelaria de la metodología 1.

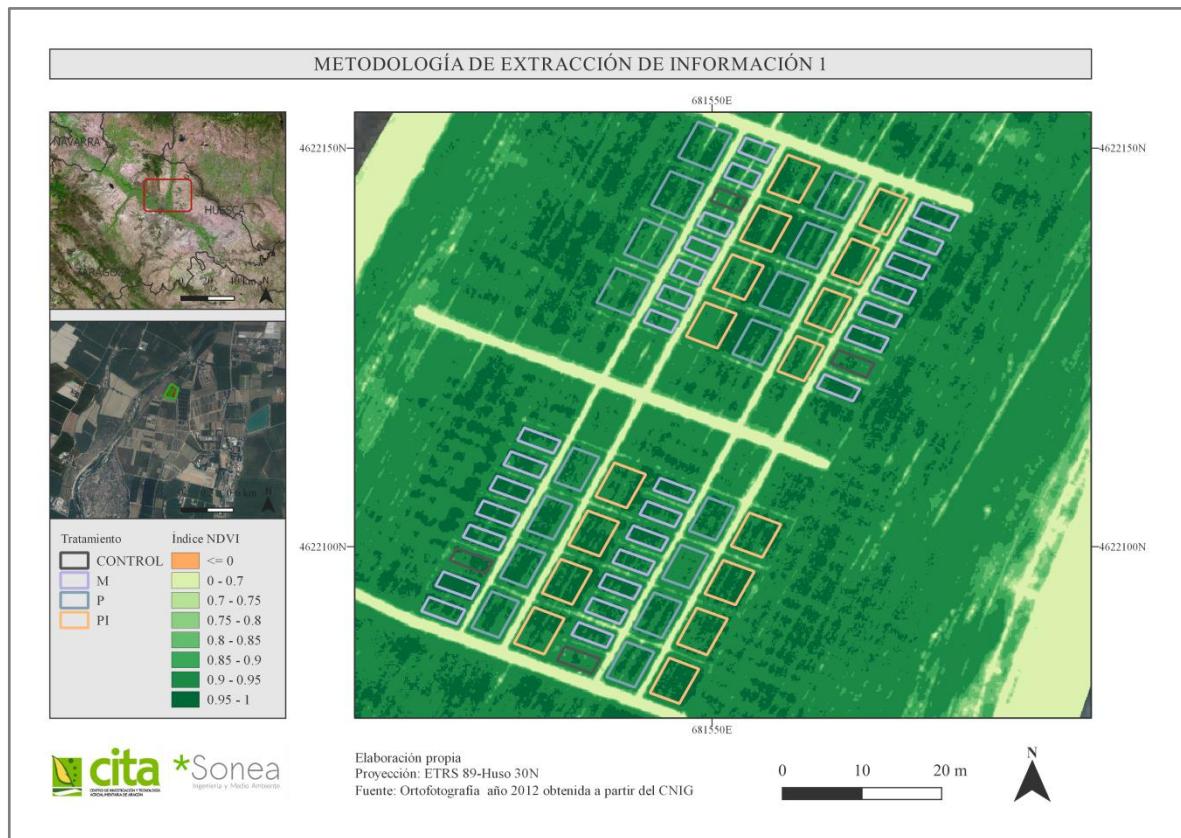


Figura 27. Polígonos de extracción de información empleando la metodología 1

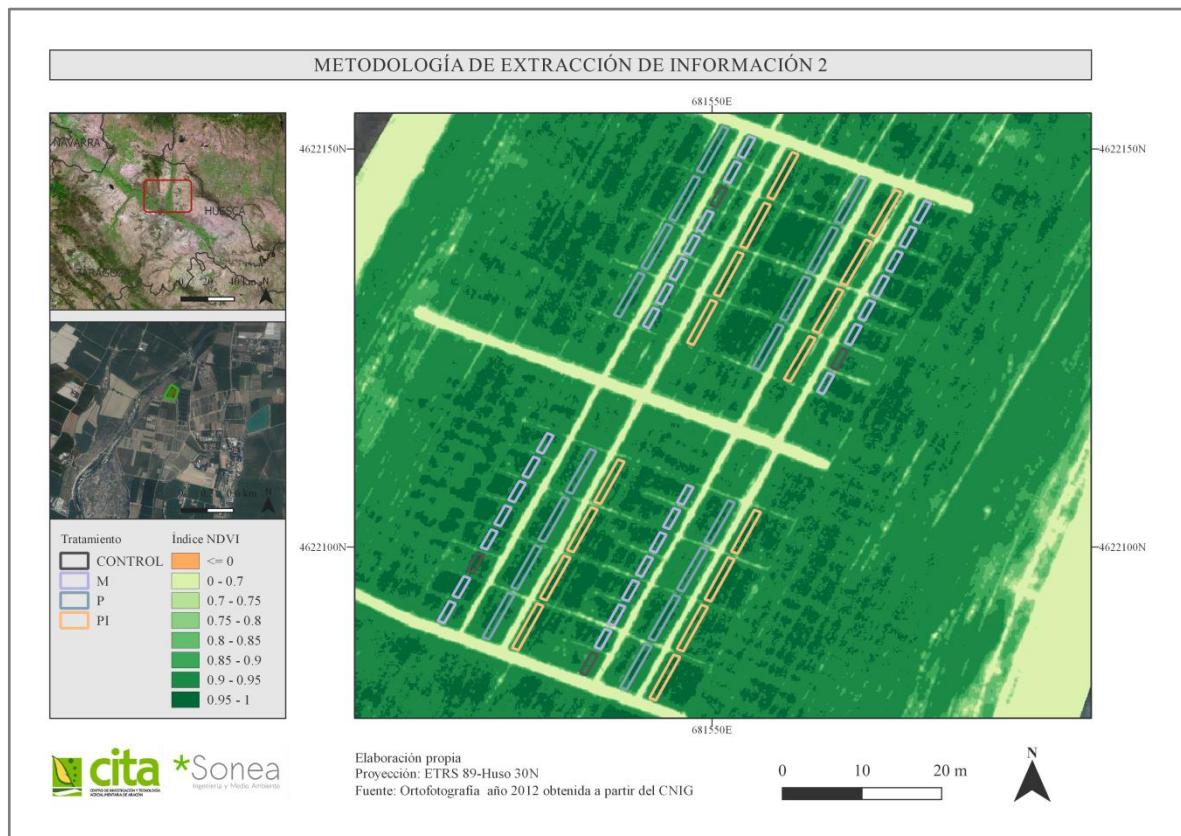


Figura 28. Polígonos de extracción de información empleando la metodología 2



Figura 29. Polígonos de extracción de información empleando la metodología 3

5.3. Análisis estadístico

Este apartado describe los métodos estadísticos aplicados para (i) el estudio de las relaciones entre los índices de vegetación calculados, (ii) la comparativa de los análisis desarrollados con las tres metodologías de extracción y (iii) el establecimiento de las relaciones entre la informaciónpectral y la producción para la estimación de las variables de la cosecha.

La correlación entre índices se realiza mediante un script realizado en el software libre R Studio con el que se comparan los cuatro índices atendiendo a la correlación de Pearson.

La correlación lineal de Pearson mide el grado de similitud lineal entre dos variables. El valor que muestra puede variar entre -1 y 1. Si el valor es positivo hay una relación directa entre las dos variables, el aumento de una variable va acompañado del aumento de la segunda variable, y si el valor es negativo la relación es inversa, disminuyendo una variable al aumento de la otra. Valores próximos a 1 indican una mayor relación, siempre considerando que los valores próximos a 0 pueden simplemente indicar que la relación existe pero no se produzca de forma lineal. (Pertegas y Pita, 2002)

El contraste de las tres metodologías se realiza con el T de Student para datos pareados, un test paramétrico realizado sobre datos normales con una muestra de datos pequeña. Se analizan las diferencias entre índices para saber si existen diferencias estadísticamente significativas entre los datos medios por tratamiento obtenidos con las distintas metodologías.

Este test realiza un contraste de la comparación de la tendencia central analizando si la hipótesis 0 de que los datos son iguales se corresponde con la realidad atendiendo siempre a un nivel de confianza del 95 %. Por tanto, se obtiene si el estadístico t es superior al valor crítico de t con una cola o dos. Este procedimiento se ha realizado mediante un script en R Studio.

La relación entre las variables espectrales y la producción se ha establecido con un análisis de regresión cuya finalidad es la de obtener si existe una asociación entre dos variables cuantitativas, una variable dependiente no determinista y una variable explicativa determinista en la mayoría de ocasiones, proporcionando un valor de ajuste de la estimación (R^2). Previamente las variables de cosecha obtenidas en campo son tratadas para obtener valores medios por parcela en cada tratamiento. Esta regresión es calculada mediante un script en R Studio.

6. RESULTADOS

Este apartado engloba los distintos resultados obtenidos referentes a los valores espetrales observados en las parcelas, a la comparativa de métodos de extracción de datos, los valores globales de producción y la relación de los índices con las variables agronómicas.

6.1. Valores de los neocanales

Los índices de vegetación generados han sido correlacionados entre sí para obtener un primer acercamiento a la relación que mantienen.

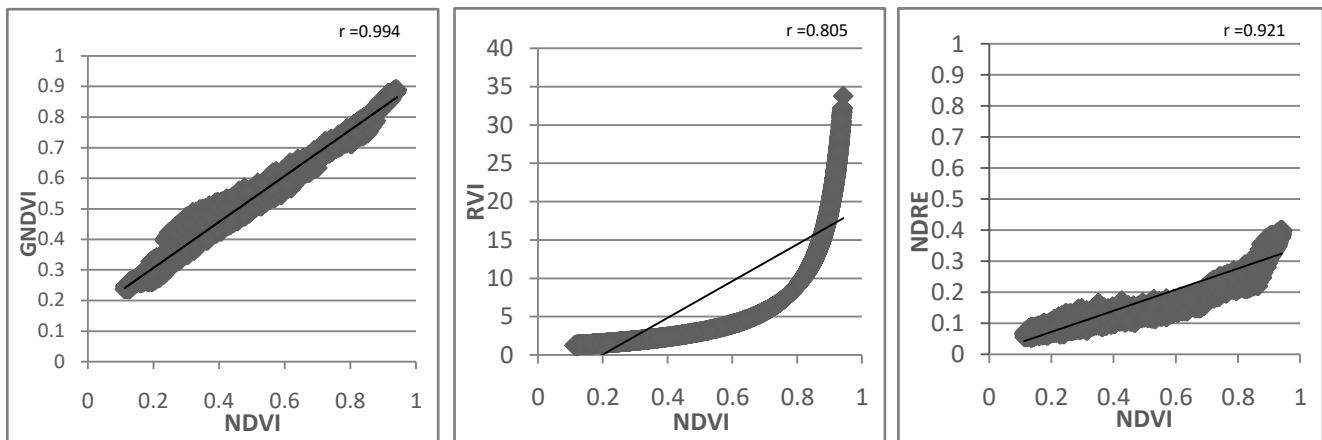


Figura 30. Análisis de correlación de los índices de vegetación

Observando la Figura 30 se percibe que los datos muestran una relación según la correlación lineal de Pearson, pero que en el caso del índice RVI con el índice NDVI la correlación es menor, observándose una tendencia hacia la regresión exponencial. Aún observándose esta correlación del NDVI con los índices NDRE y GNDVI estos no se descartan para así poder obtener el comportamiento que reflejan con los distintos aspectos agronómicos.

Las distintas metodologías de extracción muestran (Anejo 3) que principalmente el conjunto de parcelas que poseen unos menores valores en los neocanales se corresponden con las parcelas de CONTROL. En cuanto a los valores más altos en la metodología 1 se localizan en las parcelas de N120N60 y N120N90, en la metodología 2, además de en las anteriores, en las parcelas de purín N60 y en la metodología 3 en las de Purín + Inhibidor N90 junto a las de la metodología 1. Los valores medios de los índices no varían en gran cantidad, como ejemplo, en el NDVI el valor más alto es de 0.9502, en la metodología 1, y el valor más bajo es de 0.9372 o en el GNDVI el más alto es de 0.8960 y el más bajo de 0.8791. El índice que muestra una mayor variabilidad es el RVI mostrando como máximo 40.42 y como mínimo 33.40.

Los valores de menor desviación típica se corresponden con aquellos tratamientos que muestran un mayor índice. En cuanto a la media de los valores mínimos se observa que en la metodología 1 estos se encuentran en el tratamiento de purín N30 y en el caso de las otras dos metodologías se encuentra en las parcelas de control. Por último, los valores más altos se encuentran en los tratamientos de N90 de Purín y de Purín + Inhibidor. Se establece que hay parecidos en las parcelas que presentan mayor índice y menor, pero hay variabilidad entre las demás.

Hay que poner hincapié en los valores resultantes de los distintos índices debido a que estos presentan valores muy altos. Esto puede reflejar la saturación de los índices, es decir, que los valores se encuentran en la meseta del índice. Esto implicará que los datos no sean correlacionables o difícilmente correlacionables al no representar una diferencia reseñable en el valor del índice. Esto se abordará detenidamente en el apartado de discusión tras la obtención de las relaciones que estadísticamente presenta.

Los resultados correspondientes a la realización del test T de Student (Anejo 5) muestran que en la mayoría de casos el estadístico t es mayor que el valor crítico de t , lo que indica que los valores obtenidos en las distintas metodologías son significativamente diferentes. Se concluye por tanto que es necesario el análisis con todas las metodologías para así ver el comportamiento que presenta en cada una de las variantes.

6.2. Valores globales de producción por tratamientos

Los datos obtenidos en la cosecha se han analizado atendiendo a los distintos tratamientos realizados para así observar el comportamiento del trigo en las parcelas.

Los datos que se han obtenido se recogen en la Tabla 7. Esta tabla muestra que, en el caso de lo cosechado a máquina, las mayores producciones de grano se encuentran en las parcelas de purín N0 y en las parcelas de control y en el caso de la menor producción se presenta en las parcelas del tratamiento N120N0 (Figura 31).

En cuanto a los datos de producción de grano cosechado a mano los valores mayores se obtienen en las parcelas de purín N60 y N90 y la menor producción se presentan en las parcelas de N120N90. En el caso de la producción de paja el valor máximo se muestra en aquellas parcelas con un tratamiento de N120N0 y N120N30 y el menor en las de Purín + Inhibidor N30.

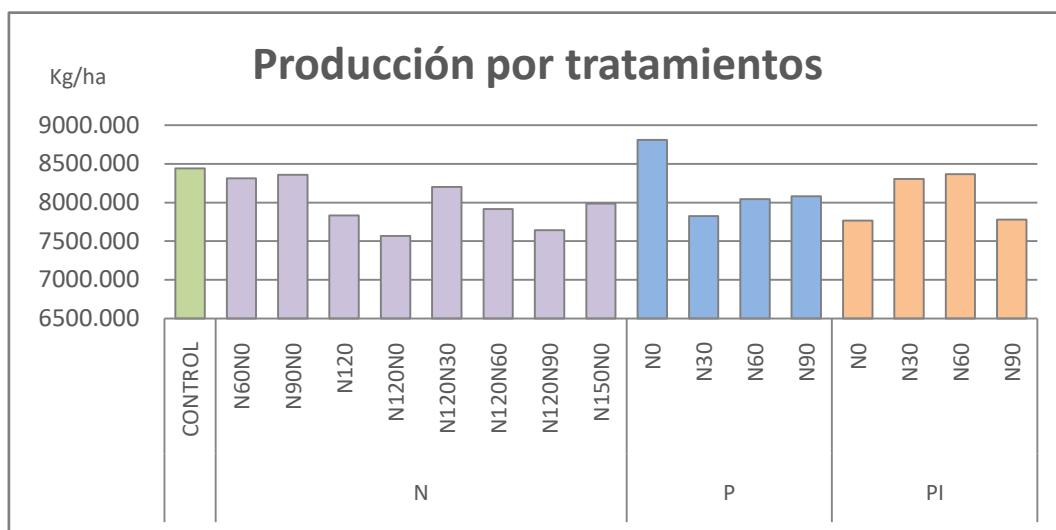


Figura 31. Producción de grano por tratamientos

Tabla 7. Valores de producción por tratamientos (Elaborado mediante datos pertenecientes a la tesis doctoral de Noemí Mateo Marín. En curso)

| | Cosecha | | | | | Biomasa (dos cuadros de 50cm x 54cm) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|--------------------------|---|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | Producción grano (kg/ha) | Producción grano al 12% humedad (kg/ha) | Producción grano a 0% humedad (kg/ha) | Peso hectolitro grano (kg/L) | Peso 1,000 granos (g) | Producción grano (kg/ha) | Producción grano 12% humedad (kg/ha) | Producción grano 0% humedad (kg/ha) | Producción paja (kg/ha) | Producción paja 0% humedad (kg/ha) | Peso hectolitro grano (kg/hL) | Peso 1,000 granos (g) | Índice de cosecha | | | | | | | | | |
| CONTROL | 8438.477 | 8634.562 | 7598.415 | 69.300 | 38.747 | 7591.435 | 7778.628 | 6845.193 | 13063.194 | 11840.959 | 68.200 | 37.054 | 0.366 | | | | | | | | | |
| N60N0 | 8311.081 | 8498.038 | 7478.273 | 70.150 | 36.434 | 7260.093 | 7432.900 | 6540.952 | 13428.796 | 12080.163 | 68.825 | 36.502 | 0.352 | | | | | | | | | |
| N90N0 | 8358.177 | 8491.951 | 7472.917 | 70.950 | 39.896 | 7363.519 | 7542.403 | 6637.315 | 13105.000 | 11862.828 | 68.100 | 37.310 | 0.358 | | | | | | | | | |
| N120 | 7832.280 | 7991.379 | 7032.414 | 69.938 | 38.868 | 7103.530 | 7270.632 | 6398.156 | 13526.100 | 12279.799 | 67.813 | 34.758 | 0.341 | | | | | | | | | |
| N120N0 | 7569.769 | 7691.380 | 6768.414 | 70.175 | 39.952 | 7385.185 | 7566.041 | 6658.116 | 14060.648 | 12857.961 | 66.575 | 33.591 | 0.342 | | | | | | | | | |
| N120N30 | 8201.190 | 8384.071 | 7377.983 | 70.075 | 39.680 | 7668.981 | 7859.840 | 6916.659 | 14023.611 | 12722.700 | 69.050 | 36.180 | 0.352 | | | | | | | | | |
| N120N60 | 7915.431 | 8079.904 | 7110.315 | 69.800 | 37.772 | 7241.991 | 7391.638 | 6504.641 | 13151.528 | 11911.303 | 68.900 | 34.776 | 0.353 | | | | | | | | | |
| N120N90 | 7642.730 | 7810.161 | 6872.942 | 69.700 | 38.070 | 6117.963 | 6265.008 | 5513.207 | 12868.611 | 11627.231 | 66.725 | 34.484 | 0.317 | | | | | | | | | |
| N150N0 | 7987.182 | 8211.695 | 7226.291 | 69.200 | 36.722 | 6327.824 | 6481.449 | 5703.675 | 13291.620 | 12019.122 | 67.375 | 34.701 | 0.323 | | | | | | | | | |
| N0 | 8808.221 | 8992.438 | 7913.345 | 72.050 | 39.167 | 7792.639 | 7986.652 | 7028.254 | 13076.343 | 11845.092 | 67.875 | 36.716 | 0.374 | | | | | | | | | |
| N30 | 7825.813 | 7979.947 | 7022.353 | 70.050 | 40.292 | 7523.843 | 7714.719 | 6788.953 | 12421.528 | 11257.831 | 67.750 | 35.485 | 0.376 | | | | | | | | | |
| N60 | 8042.818 | 8199.777 | 7215.804 | 70.525 | 39.859 | 7793.889 | 7993.598 | 7034.367 | 13184.815 | 11965.602 | 68.075 | 37.350 | 0.371 | | | | | | | | | |
| N90 | 8079.653 | 8238.517 | 7249.895 | 69.925 | 39.263 | 7901.528 | 8099.730 | 7127.763 | 12506.806 | 11404.927 | 68.400 | 36.275 | 0.386 | | | | | | | | | |
| N0 | 7764.616 | 7935.192 | 6982.969 | 70.875 | 40.782 | 7154.028 | 7317.894 | 6439.747 | 13805.231 | 12493.659 | 67.550 | 36.868 | 0.341 | | | | | | | | | |
| N30 | 8304.370 | 8473.085 | 7456.315 | 70.725 | 38.868 | 7335.000 | 7518.082 | 6615.912 | 12238.148 | 11131.539 | 67.750 | 36.990 | 0.374 | | | | | | | | | |
| N60 | 8364.052 | 8530.138 | 7506.522 | 70.325 | 37.708 | 7035.046 | 7209.641 | 6344.484 | 12820.972 | 11640.017 | 66.775 | 34.731 | 0.352 | | | | | | | | | |
| N90 | 7776.576 | 7928.933 | 6977.461 | 69.175 | 36.693 | 6958.843 | 7124.673 | 6269.712 | 13026.343 | 11801.987 | 67.150 | 35.954 | 0.346 | | | | | | | | | |
| | Valor más bajo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Valor aproximado al alto | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Valor más alto | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Las diferencias que se observan entre los datos tomados mediante máquina y los datos tomados a mano se explican por la menor variabilidad espacial de la toma de muestras que, en este caso, se traduce en una menor producción en todas las parcelas.

De manera global, los resultados observados no se muestran coherentes respecto a lo esperado, ya que las parcelas con un tratamiento nulo o bajo presentan mayor producción que aquellas con un mayor abonado, reflejando así el comportamiento contrario al habitualmente observado en estos ensayos. Las explicaciones a este hecho se abordan en una sección específica del capítulo de discusión. En cualquier caso, este comportamiento anómalo de la producción es un resultado que condiciona negativamente el establecimiento de relaciones empíricas con la informaciónpectral, que se aborda en la siguiente sección de este informe.

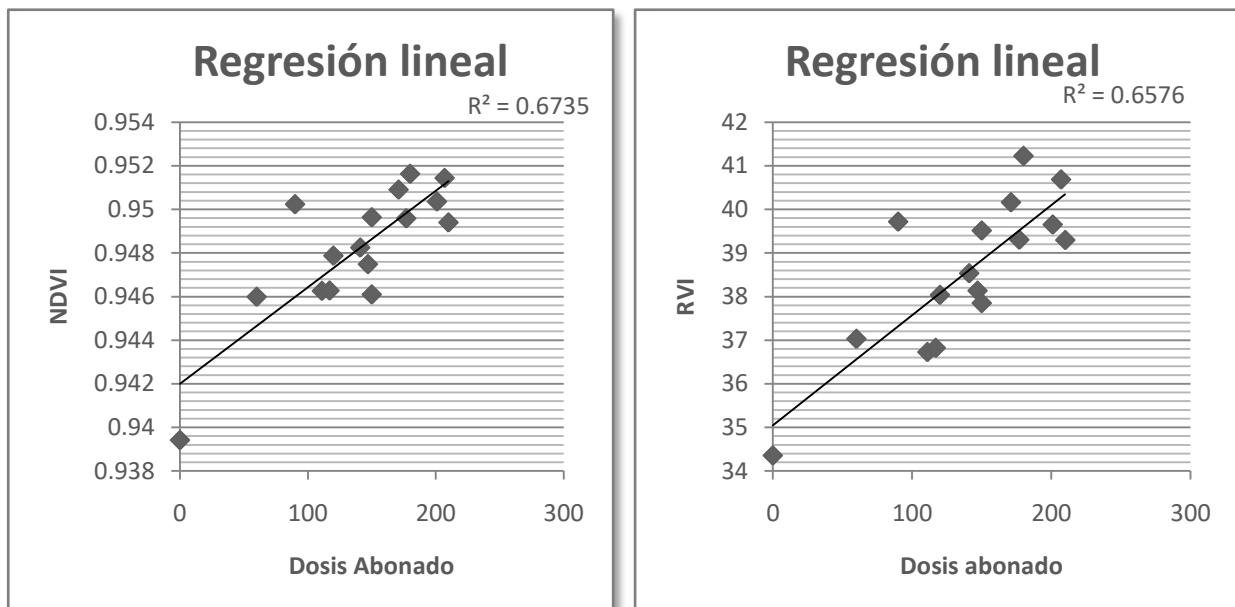
6.3. Estimación de las variables de producción

La informaciónespectral generada (NDVI, GNDVI, RVI, NDRE y CP1) es primero relacionada con el abonado aplicado en el transcurso del periodo vegetativo del trigo. Los abonados se han obtenido sumando las dosis aplicadas en la cobertura temprana y en la tardía. En el caso del abonado de purín y purín + inhibidor presentan distintas dosis en la cobertura temprana según el bloque en el que se encuentren, por lo que se ha realizado una media de la misma obteniendo 111 Kg/ha para las parcelas de purín y de 117 Kg/ha para las parcelas de purín + inhibidor. Con estos datos se procede a la realización del análisis de regresión con los valores extraídos de los neocanales mediante distintos métodos. Los resultados globales se reflejan en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de R^2 obtenidos en la estimación de la dosis de abonado con los neocanales

| | NDVI | GNDVI | RVI | NDRE | CP1 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Metodología 1 | 0.460 | 0.312 | 0.606 | 0.253 | 0.077 |
| Metodología 2 | 0.576 | 0.437 | 0.529 | 0.295 | 0.146 |
| Metodología 3 | 0.674 | 0.495 | 0.658 | 0.308 | 0.094 |

Para observar mejor el comportamiento de las distintas regresiones se observan los gráficos de dispersión de aquellas relaciones con un mayor R^2 , superior a 0.65. Ambas se corresponden a índices de vegetación obtenidos con las bandas del rojo y NIR, NDVI y RVI, y proceden de valores extraídos con la metodología en la que se han delimitado polígonos específicos para cada parcela a fin de evitar fallos de plantación y nascencia (Figura 32).



Figuras 32. Regresión lineal entre los tratamientos aplicados y los índices NDVI y RVI

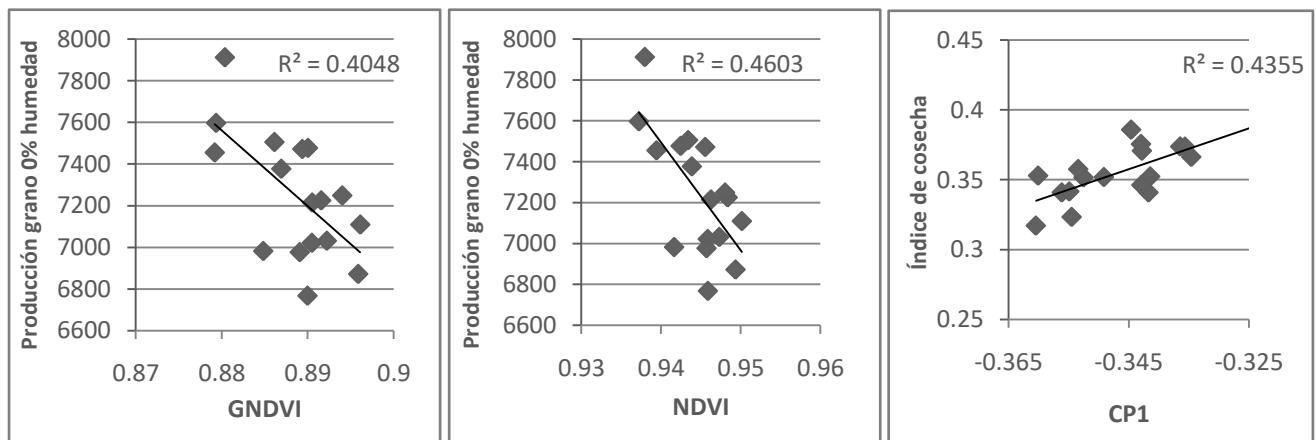
Se puede observar que los valores de los índices de vegetación tienen poco rango de variación y se corresponden con la meseta de los índices. A pesar de ello, se obtienen valores de ajuste relativamente altos que indican que la dosis de abonado aplicado al cultivo explica casi un 60% de la varianza de los índices de vegetación NDVI y RVI.

En una segunda fase, se busca comprobar si esta relación de los índices de vegetación con la dosis de abonado se traduce en una relación con las distintas variables agronómicas obtenidas. Para ello se procede a la realización de los análisis de regresión de las cinco variables espectrales con cuatro variables agronómicas: producción de grano al 0% de humedad, peso de 1000 granos, producción de paja al 0% de humedad e índice de cosecha. Todo ello para cada una de las tres metodologías de extracción, lo que genera un total de 60 análisis. Los resultados de ajuste se recogen en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores de R^2 en la relación de los neocanales con las variables agronómicas

| | VARIABLES | NDVI | GNDVI | RFI | NDRE | CP1 |
|---------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Metodología 1 | Producción (0% humedad) | 0.4603 | 0.4048 | 0.3390 | 0.2242 | 0.2822 |
| | Peso 1000 granos | 0.0293 | 0.0430 | 0.0859 | 0.1471 | 0.0616 |
| | Peso Paja (0% humedad) | 0.0019 | 0.0052 | 0.0072 | 0.0003 | 0.1318 |
| | Índice de cosecha | 0.1651 | 0.1456 | 0.1203 | 0.1451 | 0.4355 |
| Metodología 2 | Producción (0% humedad) | 0.1905 | 0.2812 | 0.1552 | 0.1723 | 0.2300 |
| | Peso 1000 granos | 0.0093 | 0.3198 | 0.0194 | 0.1728 | 0.0502 |
| | Peso Paja (0% humedad) | 0.0723 | 0.0173 | 0.0740 | 0.0168 | 0.0445 |
| | Índice de cosecha | 0.0041 | 0.0348 | 0.0026 | 0.0863 | 0.2564 |
| Metodología 3 | Producción (0% humedad) | 0.1734 | 0.2824 | 0.1812 | 0.1935 | 0.2359 |
| | Peso 1000 granos | 0.0290 | 0.0483 | 0.0566 | 0.1496 | 0.0650 |
| | Peso Paja (0% humedad) | 0.0326 | 0.0066 | 0.0365 | 0.0066 | 0.1204 |
| | Índice de cosecha | 0.0206 | 0.0442 | 0.0256 | 0.0908 | 0.3876 |

Como se observa del análisis conjunto de resultados, los valores de ajuste no alcanzan en ningún caso el 50% de estimación. Aunque siempre por debajo de este umbral, se observa que los mejores ajustes se alcanzan con el índice NDVI, original y modificado, para la estimación de la variable agronómica producción sin humedad (R^2 de 0.46 y 0.40, respectivamente) y con el CP1 para la estimación del índice de cosecha (R^2 de 0.44). Estas tres mejores relaciones se observan todas con la metodología de extracción 1, es decir, aquella en la que se ha eliminado exclusivamente la influencia de los píxeles de borde y, por tanto, la que incluye mayor variabilidad espacial en sus valores promedio. La figura 33 recoge gráficamente estas tres regresiones.



Figuras 33. Relaciones de aquellos índices que han mostrado un mayor valor con las variables agronómicas.

A pesar de observar de nuevo poca variabilidad en el rango de valores espectrales, señal de que los índices se encuentran en su meseta, es especialmente interesante el potencial que ha demostrado el índice NDVI o GNDVI en la estimación de la producción sin humedad, la variable agronómica más representativa.

En relación con lo observado en el análisis anterior, con la dosis de abonado, se observa que los índices espectrales han perdido capacidad predictiva para estimar las variables agronómicas. Sin duda este hecho, como se ha apuntado anteriormente, viene condicionado por la anómala influencia que la dosis de abonado ha tenido en la producción específica de este ensayo.

Esto se ha traducido en que el abonado sí que ha influido en el vigor vegetal del trigo pero esta relación no se ha traducido tan claramente en la producción.

7. DISCUSIÓN

Obtenidos los resultados, se plantean atendiendo a un ámbito científico. Esto es realizado para justificar el porqué del reflejo de estos resultados y tratar también desde esta visión los problemas en (i) la calidad de la imagen multiespectral obtenida, (ii) la saturación de los índices agronómicos y (iii) la respuesta del trigo a la fertilización.

7.1. Calidadpectral de las imágenes obtenidas con UAV

Según distintos estudios y más exactamente según Pérez (2016), la respuesta espectral media del trigo blando en las bandas del verde y el rojo, en Riegos del Alto Aragón en su caso, el 20 de abril de 2015 es de 0.054 y de 0.048 respectivamente y en el NIR es de 0.368 de media y el 4 de abril del mismo año es de 0.08 aproximadamente en el visible, mientras que en NIR es de 0.40.

En cambio, en la imagen multiespectral obtenida mediante UAV se obtienen valores del 3% de reflectividad en la banda del verde, 1.5% en la banda del rojo y 60 % en la banda del NIR. Esto muestra una menor respuesta en estas bandas y por tanto una infraestimación producida por el error en las dos lentes. En la banda del NIR se genera una mayor respuesta, lo cual puede venir influenciado por el tamaño de píxel al mostrar un píxel más puro en la imagen de UAV al presentar una resolución espacial mayor. Obteniéndose valores bajos en las bandas del visible pueden producirse índices sobrelevados en el NDVI y generarse una dificultad para apreciar las diferencias, como se indica en el siguiente apartado.

Los UAV están revolucionando la captura de geoinformación, permitiendo realizar capturas bajo demanda y de rápido despliegue (Ballari, 2015). Hay que tener en cuenta este carácter novedoso y por tanto la dificultad y problemas que acarrea su utilización.

Los UAV son una tecnología muy reciente, surgida hace poco y que ha generado un cambio muy considerable en el pensamiento del tratamiento de las imágenes multiespectrales. Este fenómeno ha generado que las personas crean que este método está exento de errores produciendo así una falsa creencia siendo, en realidad, que los UAV han presentado problemas en los sensores. Estos se han ido solucionando a lo largo del tiempo. También, se observan en algunos casos errores radiométricos, mostrando errores tanto puntuales como de toda la imagen.

7.2. Índices de vegetación como variable espectral para la estimación de variables agronómicas

Al analizar los resultados obtenidos se observa que hay una variación mínima entre parcelas mostrando generalmente una diferenciación de 0.02 – 0.03 en el índice de vegetación o en el ACP, siendo mayor en el RVI. También cabe destacar el valor de 0.90 aproximadamente en el caso del NDVI. Estas características muestran que los distintos valores se encuentran en el techo del índice, es decir que están saturados.

Los índices que se basan en la respuesta espectral del rojo y del NIR tratan de reflejar el estado del cultivo en cuanto a su crecimiento. Los IV tratan de generar una línea recta usando solo un valor que representan una cantidad desconocida de vegetación mezclada con un suelo de reflectividad también desconocido (Paz-Pellat, 2007).

Los IV tienden a presentar una saturación. El punto de saturación, el cual también es llamado de reflectancia infinita o de medio denso, es función de las propiedades de las hojas y de su distribución angular (Paz-Pellat, 2014). Las bandas del visible presentan una saturación muy rápida cuando la densidad de vegetación es muy alta. En cuanto a la banda del NIR, esta alcanza mayores valores de reflectividad y presenta un patrón espectral similar al de las hojas (Paz-Pellat, 2010). Según la teoría de transferencia radiativa, la banda con mayor valor de reflectancia foliar se satura más lentamente (Ross, 1981) y por tanto este punto está en líneas de vegetación más altos. Por ello, para solucionar el problema se deben de realizar y aplicar otro tipo de índices que no muestren saturación y que incorporen las distintas curvas de suelo.

7.3. Respuesta espectral del trigo a la fertilización

La producción no se corresponde con un comportamiento natural frente a la utilización de abonado nitrogenado por lo que no responde a ningún patrón reseñable. Se justifica, mediante distintos estudios, que el N aplicado aumenta el rendimiento del trigo pero que la respuesta del cultivo a esta aplicación depende también tanto de factores edáficos, como climáticos y de manejo. Se conoce que aplicar cantidades excesivas de nitrógeno puede acarrear el efecto contrario reduciéndose así su eficiencia e incrementando el lavado de nitratos.

Se desconoce cuál es la causa por la que el ensayo no presentan dicha respuesta esperada presentando incluso mayor producción las parcelas de control frente aquellas en las que se han aplicado tratamientos.

8. CONCLUSIONES

La producción y las distintas variables agrícolas han ido siempre ligadas a los intereses de los empresarios de este sector. Por esto, se han desarrollado gran cantidad de estudios referentes a ello obteniéndose así distintos resultados. Uno de estos resultados, que en este caso es tomado como hipótesis, es el de la existencia de una relación de la producción (entre otras variables agronómicas) y los distintos neocanales

Esta hipótesis no ha podido ser contrastada debido a varias razones:

- Tras la valoración de la respuesta espectral de la imagen, se supone una infraestimación en donde las bandas del sensor (bandas verde y roja), lo que puede alterar las respuestas de la cubierta. Esto influye en la generación de los distintos neocanales favoreciendo su saturación, la cual ya venía auspiciada por la abundante vegetación y conduciendo a una menor diferenciación de respuestas.
- La producción de trigo no ha respondido de forma coherente a las dosis de abonado aplicadas a cada una de las divisiones. Esto ha dificultado la posibilidad de establecer unas buenas relaciones entre la información espectral obtenida y las variables agronómicas de estudio.

Atendiendo a los subobjetivos que se establecieron en el trabajo se obtienen los siguientes resultados:

- No se observa una diferencia de producción entre las parcelas experimentales por la casuística que se ha marcado ya anteriormente.
- Respecto a la mejor metodología de extracción de datos, se observa que la metodología que elimina el efecto de los pasillos y de los píxeles de borde (metodología 1) presenta una mejor estimación de las variables agronómicas con los distintos índices. En cambio, la metodología en la que se elimina la influencia de los fallos de plantación y nascencia (metodología 3) relaciona más correctamente el abonado aplicado con los índices. Con esto, se excluye la utilización de la metodología que realiza la parcelación atendiendo a la línea de cosecha marcada por la máquina (metodología 2) debido a sus bajos valores de relación.
- En cuanto a las variables espetrales. Se concluye que, aun teniendo los distintos problemas observados, los índices de vegetación muestran una mayor relación que el componente principal 1 con las variables agronómicas. Dentro de los índices de vegetación, el NDVI es el que muestra una mayor relación con el abonado aplicado ($R^2 = 0.68$) y el que muestra también una mayor relación con la variable agronómica principal, la producción grano al 0% de humedad ($R^2 = 0.68$). Con esto se muestra una relación del abonado con el vigor vegetal del trigo que no se refleja, tan claramente, en la producción obtenida.

En estudios futuros, la realización de estos métodos empíricos será importante para la estimación de producción siempre y cuando se avance hacia una mejora de la toma de imágenes UAV en el que todas las bandas reflejen una información espectral válida. También favorecerá que se obtengan producciones de trigo que muestren una relación con el abonado aplicado y con la respuesta espectral. Se marca tras este estudio por tanto, que la metodología más correcta para la estimación de producción sería utilizando el total de la parcela, eliminando solo los píxeles de borde, y relacionándolo con la información de índice NDVI.

9. AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mi familia por el gran esfuerzo que han realizado para que pueda efectuar los estudios de máster, los cuales concluyo con la realización de dicho TFM; agradecer también a Raquel Montorio Llovería por la tutela del trabajo y la disponibilidad para la ayuda y solución de los aspectos correspondientes al proyecto, así como a Marta Mercadal Minguijón y M^a Auxiliadora Casterad Seral que han ejercido también como tutoras de las prácticas que han dado lugar al trabajo y al resto del equipo de la empresa SONEA Ingeniería y Medio Ambiente Marco Gastón Romeo, Clara Portero Callejero y Patricia Salas Remón, así como a Noemí Mateo Marín y Dolores Quílez Saez de Viteri del CITA.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Abaurrea Pereda, M. (2013). Comparación de índices de vegetación en zona semiárida de navarra. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. (Universidad Pública de Navarra).
- Abdat, N. *Integración de datos procedentes de sensores remotos en modelos de seguimiento del crecimiento y estimación de cosecha en trigo*. Unpublished CIHEAM (Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza), Junta de Andalucía y Universidad de Lleida,
- Abdat, N., González-Dugo, M. P., Padilla, F. L. M., Arnesto, A. P., Carpintero, E., & Lafarga, A. (2015). Integración de datos remotos en modelos de estimación y predicción de cosecha en trigo a escala local y comarcal. *Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso De La Asociación Española De Teledetección*. Sevilla. pp. 112.
- Ballari, D., Acosta, E., Espinoza, A., Orellana, D., Morocho, V., & Martín, M. y Hardter, U.F. (2015). Análisis de imágenes de las islas galápagos. *Revista GEOESPACIAL*, 12, 26.
- Bergh, R., & Baez, A. Quattrocchio, A y Zamora, M. (2000). Fertilización nitrogenada para calidad en trigo candeal. *Informaciones Agronómicas*.
- Calera, A., Reyes Ruiz, J., & Martínez, C. y. S., J. (1999). Seguimiento de los cultivos de regadío en la mancha oriental desde 1982 a 1997, utilizando imágenes TM y MSS, en combinación con herramientas SIG. *TELEDETECCIÓN. Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional De Teledetección*. Albacete, España. pp. 197.
- Castillo G, H. y Santibañez Q, F. (1987). Efecto de la temperatura sobre la fenología del trigo (cultivar aurifen). [Temperatura effect on the phenology of wheat, cv. Aurifén] *Agricultura Técnica*, 47, 29.
- Centro Nacional de Información Geográfica. Centro de descargas. Retrieved Julio 2016 <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?#selectedSerie>
- Chuvieco Salinero, E. (2002). *Teledetección ambiental. la observación de la tierra desde el espacio* (3^a Edición actualizada: septiembre de 2008 ed.) Editorial Ariel, S.A.
- Cordone, G. y. M.,F. (2002). Efecto de la aplicación de azufre y distintas dosis de nitrógeno sobre el rendimiento del doble cultivo trigo/soja. *Informaciones Agronómicas Del Cono Sur*, 13
- de Castro Jorge, L.A. y Inamasu, R.Y. (2013). Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. *Ferramentas Para Agricultura De Precisão*, 8, 109.
- de la Vega Ruiz, G. (2009). Proteínas de la harina de trigo: Clasificación y propiedades funcionales. *Temas De Ciencia y Tecnología*, 13, 27.
- Díaz García-Cervigón, J. J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Universidad Complutense de Madrid).
- Díaz-Zorita, M. (2000). Efecto de dos momentos de aplicación de urea sobre la producción de grano de trigo en drabble (buenos aires, argentina). [Urea fertilization timing effect on wheat grain yields in Drabble (Buenos Aires, Argentina)] *Ciencias Del Suelo*, 18, 125.
- Fernández- Quintanilla, C. (2013). Manejo de malas hierbas: ¿Hacia dónde vamos? *XII Congreso De La SEMh/ XIX Congreso De La ALAM/ II Congresso De La IBCM*, Valencia. pp. 3111.

- Fernandez-Quintanilla, C. (2006, 15 de marzo de 2006). Perspectivas para la agricultura de precisión en España. *Nuevas Tecnologías*, , 12.
- Ferrero, S. B., & Palacio, M. G. y. C., O.R. (2002). Análisis de componentes principales en teledetección. consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación. *Revista De Teledetección*, , 43.
- Filella, I. y Peñuelas, J. (1994). The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *Remote Sensing*, 15(7), 1459.
- Franch, B., Vermote, E., Becker-Reshef, I., & Claverie, M. y. S., J.A. (2015). Predicción de la producción de trigo en estados unidos, ucrania y canadá. *Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso De La Asociación Española De Teledetección*. Sevilla. pp. 620.
- Gambaudo, S. y. L., O. (2005). Eficiencia en el uso de los fertilizantes: Efecto del inhibidor de la enzima ureasa. *Información Técnica Cultivos De Verano*, , 14.
- Gastón Romeo, M. (2014). Clasificación digital de imágenes landsat y caracterización de los pastos de puerto en el parque natural de los valles occidentales. Universidad de Zaragoza).
- Gilabert, M. A., & González-Piqueras, J. y. G., J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista De Teledetección*, 8, 1.
- Ginestet, P. C. (2014). Estimación de rendimientos y contenido de proteína en el cultivo de trigo cana-deal mediante la utilización de sensores remotos., 1.
- Gonzalez, L., Calera, M., Villodre, J., Bodas, V., & Campos, I. y. C., A. (2015). Secuencias temporales de imágenes y datos meteorológicos para caracterizar variabilidad en parcelas de trigo y maíz. *Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso De La Asociación Española De Teledetección*. Sevilla. pp. 80.
- Guerrero García, A. (1999). *Cultivos herbáceos extensivos* Mundi-Prensa.
- Guillen, M., Montorio, R., & Pérez-Cabello, F. y Casterad, M.A. (2011). Aplicabilidad del uso de un panel de PTFE (politetrafluroetileno) como blanco de referencia., 513.
- Guillermo O, M. (2006). Cultivo del trigo. *Cátedra De Forrajes y Cereales*, Tucumán.
- Hervie, B. (1997). Los campos del futuro. Ministerio de agricultura
- IdeAragón. *Directorio de servicios web*. Retrieved Julio 2016
http://idearagon.aragon.es/directorio_ws.jsp
- Isla, R. y. L., R. (2005). Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz. 24(*Revista de Teledetección*), 5.
- Leiva, F. R. y. P. D. (2003). La agricultura de precisión: Una producción más sostenible y competitiva con visión futurista. *Fitomejoramiento y Producción De Cultivos*, Bogotá.
- Marote, M. L. (2010). Agricultura de precisión. *Ciencia y Tecnología*, 10, 143.
- Méndez, A. :. M., R., Villarroel, D., Juan, N., & Vélez, J. P. y. A., S.M. (2012). Rendimiento y proteína de diferentes variedades de trigo en función de la dosis de fertilización nitrogenada., 1.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio rural y marino. (2010). *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España* (Ministerio de Medio Ambiente y Medio rural y marino ed.)
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio rural y marino. (2010). *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. parte II*. (Ministerio de Medio Ambiente y Medio rural y marino ed.)
- Moreno-García, B., Guillén, M., & Casterad, M. A. y. Q., D. (2013). Uso de imágenes aéreas multispectrales para estimación del rendimiento en cultivo de arroz. *XV Congreso De La Asociación Española De Teledetección INTA*. Torrejón de Ardoz (Madrid). pp. 357.
- Morillas, L., García, M., Zarco-Tejada, P., Ladrón de Guevara, M., Villagarcía, L., & Were, A. y. D., F. (2009). Obtención de la conductancia de la vegetación a partir de índices espectrales y temperatura superficial para la estimación de la evapotranspiración en vegetación semiárida. *Congreso Científico De La Universidad De Murcia*. pp. 583.

- Muñoz Aguayo, P. (2013). *Índices de vegetación*. Gobierno de Chile: CIREN.
- Muñoz Padilla, F. L. (2011). Integración de datos remotos en modelos de crecimiento y estimación de cosecha de cultivos herbáceos. aplicación a escala local sobre trigo y maíz. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba.
- Odi-Lara, M., Paz-Pellat, F., & López-Urrea, R. y. G., J. (2010). Limitaciones en la estimación de variables biofísicas en cultivos usando índices de vegetación espectrales: Efecto de la densidad del follaje. [Limitations in the estimation of biophysical variables in crops using spectral vegetation indexes: foliage density effect.] *Agrociencia*, 44, 807.
- Paz Pellat, F., Romero Sánchez, M. E., Palacios Vélez, E., Bolaños González, M., & Valdez Lazalde, J.R. Y Aldrete, A. (2014). Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: Marco teórico. [Scopes and Limitations of Spectral Vegetation Indexe: Theoretical Franme-work.] *Terra Latinoamericana*, 32, 177.
- Paz-Pellat, F., Palacios-Vélez, E., Bolaños-González, M., Palacios-Sánchez, L. A., Martínez-Menes, M., & Mejía-Saenz, E. y Huete, A. (2007). Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. [Desing of a vegetation spectral index: NDVIcp] *Agrociencia*, 41, 539.
- Paz-Pellat, F., Reyes, M. y Medrano, E. (2011). Diseño de índices espectrales de la vegetación usando curvas iso-suelo. [Desing of spectral vegetation indexes using iso-soil curves] *Agrociencia*, 45, 121.
- Pérez Cardiel, E. (2016). Identificación temprana de cultivos mediante teledetección en apoyo a la implementación de la PAC en "riesgos del alto aragón". Universidad de Zaragoza.
- Pértegas Díaz, S. y Pita Fernández, S. (2002). Determinación del tamaño muestral para calcular la significación del coeficiente de correlación lineal.
- RapidEye. (2012), The RapidEye red edge band., 1.
- Real Decreto-Ley 8/2014, De 4 De Julio, De Aprobación De Medidas Urgentes Para El Crecimiento, La Competitividad y La Eficiencia De Las Aeronaves Pilotadas Por Control Remoto. (2014).
- Redagrícola. (2016). Novedades en fertilizantes nitrogenados. 3^a Conferencia y Exhibición Redagrícola Chile.
- Reyes, M., Paz, F., Caslano, M., Pascual, F., & Márin, M.I. Y Rubiños, E. (2010). Caracterización del efecto de estrés usando índices espectrales de la vegetación para la estimación de variables relacionadas con la biomasa aérea. [Characterization of stress effect using spectral vegetation indexes for the estimate of variables related to aerial biomass] *Agrociencia*, 45, 211.
- Rivas, R., & Ocampo, D. y. C.,F. (2011). Modelo de predicción de rendimiento de reigo a partir de NDVI: Aplicación en el contexto de la agricultura de precisión. XV Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, Curitiba. pp. 0584.
- Rodrigo Ortega B. y Luis Flores M. (1999). Agricultura de precisión: Introducción al manejo sitio-específico.
- Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. W. Junk. Norwell, MA, EEUU
- Salvagiotti, F., & Ferraguri, F. y Manila, A. (2012). Respuesta a la fertilización y eficiencia en el uso de nitrógeno en maíz de siembra tardía sobre diferentes antecesores utilizando inhibidores de ureasa. *Congreso Latinoamericano De La Ciencia Del Suelo*. Mar de Plata, Argentina. pp. 2.
- Sanza Moral, B. (2012). Posibilidad de uso de imágenes aéreas multiespectrales y radiometría de campo en la evaluación de la disponibilidad de nitrógeno en cereales. Universidad de Zaragoza.
- Satorre, E. H. (2005, Junio-Julio 2005). Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Cien-cia HOY*, 15, 24.
- Vargas Vieyra, M. (2013). Análisis de componentes principales en teledetección. Universidad de Buenos Aires).
- Wang, L., Tian, Y., Yao, X., & Zhu, Y. y. C.,W. (2014). Predicting grain yield and protein content in wheat by fusing multi-sensor and multi-temporal remote-sensing images. 164, 178.

11. ANEJOS

11.1. Anejo 1: Fotografías de cultivo y cosecha



Figura 1 Anejo 1. Aspecto cultivo de trigo día de vuelo



Figura 2 Anejo 1. Aspecto cultivo de trigo día de vuelo



Figura 3 Anejo 1. Aspecto cultivo de trigo día de vuelo

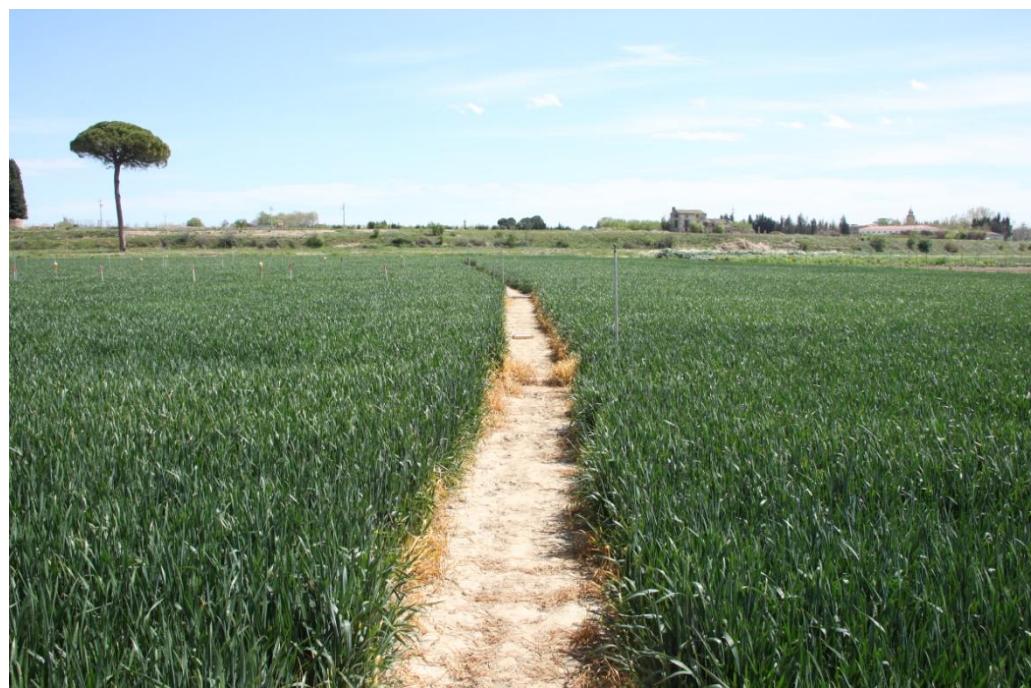


Figura 4 Anejo 1. Aspecto cultivo de trigo día de vuelo



Figura 5 Anejo 1. Aspecto cultivo de trigo día de vuelo



Figura 6 Anejo 1. Aspecto cultivo de trigo día de cosecha



Figura 7 Anejo 1. Aspecto cultivo de trigo día de cosecha



Figura 8 Anejo 1. Aspecto cultivo de trigo día de cosecha



Figura 9 Anejo 1. Aspecto cultivo de trigo día de cosecha

11.2. Anejo 2: Variables de producción obtenidas

Tabla 1 Anejo 2. Datos de los aspectos agronómicos de estudio obtenidos (Tesis doctoral de Noemí Mateo Marín, en curso)

| Parcela | Bloque | Tratamiento | Cosecha | | | | | Biomasa (dos cuadros de 50cm x 54cm) | | | | | | | | | | |
|---------|--------|-------------|------------------------|-----------|--|--------------------------|---|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------|
| | | | Longitud cosechada (m) | Ancho (m) | Superficie cosechada teórica (m ²) | Producción grano (kg/ha) | Producción grano al 12% humedad (kg/ha) | Producción grano a 0% humedad (kg/ha) | Peso hectólitro grano (Kg/hL) | Peso 1,000 granos (g) | Producción grano (kg/ha) | Producción grano 12% humedad (kg/ha) | Producción grano 0% humedad (kg/ha) | Producción paja (kg/ha) | Producción paja 0% humedad (kg/ha) | Peso hectolitro grano (kg/hL) | Peso 1,000 granos (g) | Índice de cosecha |
| 1 | 1 | N60N0 | 3.55 | 1.65 | 5.86 | 8,126 | 8,274 | 7,281 | 70.6 | 41.19 | 6,929 | 7,107 | 6,254 | 14,421 | 13,096 | 70.2 | 38.42 | 0.32 |
| 2 | 1 | N120N60 | 3.17 | 1.65 | 5.23 | 7,665 | 7,822 | 6,883 | 67.9 | 37.29 | 7,711 | 7,887 | 6,941 | 13,904 | 12,591 | 69.7 | 34.95 | 0.36 |
| 3 | 1 | CONTROL | 3.17 | 1.65 | 5.23 | 8,861 | 9,075 | 7,986 | 70.3 | 42.71 | 7,523 | 7,717 | 6,791 | 12,453 | 11,373 | 69.6 | 38.53 | 0.37 |
| 4 | 1 | N90N0 | 3.09 | 1.65 | 5.10 | 8,967 | 9,164 | 8,065 | 71.7 | 41.48 | 7,794 | 7,990 | 7,031 | 12,821 | 11,591 | 70.7 | 40.10 | 0.38 |
| 5 | 1 | N150N0 | 3.15 | 1.65 | 5.20 | 8,662 | 9,034 | 7,950 | 69.2 | 38.68 | 6,019 | 6,169 | 5,429 | 11,703 | 10,617 | 67.8 | 33.50 | 0.34 |
| 6 | 1 | N120N90 | 3.30 | 1.65 | 5.45 | 6,882 | 6,997 | 6,158 | 71.7 | 39.81 | 7,139 | 7,327 | 6,448 | 13,826 | 12,461 | 70.1 | 33.16 | 0.34 |
| 7 | 1 | N120N30 | 3.20 | 1.65 | 5.28 | 8,172 | 8,323 | 7,324 | 70.7 | 39.78 | 7,595 | 7,790 | 6,855 | 13,501 | 12,191 | 71.8 | 36.65 | 0.36 |
| 8 | 1 | N120N0 | 3.30 | 1.65 | 5.45 | 7,546 | 7,701 | 6,777 | 71.4 | 41.47 | 7,819 | 8,021 | 7,058 | 14,322 | 13,059 | 68.2 | 31.40 | 0.35 |
| 9 | 1 | N0 | 6.60 | 1.65 | 10.89 | 8,462 | 8,631 | 7,596 | 74.6 | 41.17 | 6,245 | 6,419 | 5,649 | 13,339 | 12,110 | 67.9 | 31.99 | 0.32 |
| 10 | 1 | N60 | 6.60 | 1.65 | 10.89 | 8,437 | 8,596 | 7,565 | 72.2 | 42.49 | 7,064 | 7,253 | 6,382 | 12,740 | 11,643 | 69.7 | 37.26 | 0.35 |
| 11 | 1 | N30 | 6.60 | 1.65 | 10.89 | 8,219 | 8,371 | 7,367 | 70.5 | 42.17 | 7,475 | 7,666 | 6,746 | 11,808 | 10,677 | 70.3 | 34.70 | 0.39 |
| 12 | 1 | N90 | 6.62 | 1.65 | 10.92 | 8,124 | 8,260 | 7,269 | 72.3 | 41.94 | 8,059 | 8,277 | 7,284 | 13,244 | 12,041 | 69.8 | 34.99 | 0.38 |
| 13 | 1 | N60 | 6.50 | 1.65 | 10.73 | 8,358 | 8,539 | 7,514 | 71 | 38.43 | 6,276 | 6,458 | 5,683 | 12,150 | 11,036 | 66.7 | 33.10 | 0.34 |
| 14 | 1 | N90 | 6.70 | 1.65 | 11.06 | 8,597 | 8,750 | 7,700 | 71.5 | 38.89 | 7,730 | 7,945 | 6,992 | 13,685 | 12,437 | 68.8 | 33.50 | 0.36 |
| 15 | 1 | N30 | 6.55 | 1.65 | 10.81 | 8,448 | 8,615 | 7,581 | 70.9 | 38.29 | 7,815 | 8,034 | 7,070 | 12,950 | 11,683 | 68.4 | 33.92 | 0.38 |
| 16 | 1 | N0 | 6.70 | 1.65 | 11.06 | 8,762 | 8,981 | 7,903 | 69.5 | 41.58 | 7,341 | 7,514 | 6,612 | 12,218 | 11,132 | 68.7 | 36.08 | 0.37 |
| 17 | 2 | CONTROL | 3.60 | 1.65 | 5.94 | 9,348 | 9,575 | 8,426 | 69.6 | 38.62 | 7,644 | 7,834 | 6,894 | 13,376 | 12,136 | 67.9 | 37.84 | 0.36 |
| 18 | 2 | N120N60 | 3.25 | 1.65 | 5.36 | 8,386 | 8,568 | 7,540 | 71.3 | 37.47 | 7,741 | 7,925 | 6,974 | 13,485 | 12,411 | 68.7 | 36.41 | 0.36 |
| 19 | 2 | N120N30 | 3.20 | 1.65 | 5.28 | 8,483 | 8,686 | 7,644 | 67.9 | 38.67 | 7,983 | 8,182 | 7,201 | 13,886 | 12,706 | 67.0 | 37.83 | 0.36 |
| 20 | 2 | N150N0 | 3.20 | 1.65 | 5.28 | 7,390 | 7,561 | 6,654 | 67 | 33.05 | 6,259 | 6,420 | 5,650 | 15,701 | 14,205 | 65.1 | 32.88 | 0.28 |
| 21 | 2 | N120N0 | 3.35 | 1.65 | 5.53 | 7,463 | 7,624 | 6,709 | 67.8 | 37.56 | 6,890 | 7,067 | 6,219 | 14,897 | 13,673 | 64.9 | 32.38 | 0.31 |

| 22 | 2 | N90N0 | 3.22 | 1.65 | 5.31 | 8,035 | 7,996 | 7,036 | 71.3 | 39.20 | 7,227 | 7,393 | 6,506 | 13,801 | 12,327 | 65.5 | 34.15 | 0.35 |
|----|---|---------|------|------|-------|-------|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|------|-------|------|
| 23 | 2 | N60N0 | 3.20 | 1.65 | 5.28 | 8,464 | 8,677 | 7,636 | 69.4 | 40.12 | 6,768 | 6,937 | 6,105 | 13,467 | 11,964 | 69.3 | 33.96 | 0.34 |
| 24 | 2 | N120N90 | 3.08 | 1.65 | 5.08 | 8,351 | 8,546 | 7,520 | 69.2 | 39.34 | 7,341 | 7,527 | 6,624 | 13,114 | 11,929 | 63.2 | 35.65 | 0.36 |
| 25 | 2 | N30 | 6.80 | 1.65 | 11.22 | 8,619 | 8,789 | 7,734 | 68.8 | 38.35 | 7,476 | 7,669 | 6,749 | 12,996 | 11,715 | 66.2 | 37.53 | 0.37 |
| 26 | 2 | N60 | 6.75 | 1.65 | 11.14 | 8,523 | 8,727 | 7,680 | 70.9 | 39.82 | 8,319 | 8,524 | 7,501 | 13,336 | 11,877 | 66.7 | 39.32 | 0.39 |
| 27 | 2 | N0 | 6.30 | 1.65 | 10.40 | 9,259 | 9,469 | 8,332 | 70.6 | 38.76 | 7,328 | 7,506 | 6,605 | 15,889 | 14,392 | 65.2 | 36.43 | 0.31 |
| 28 | 2 | N90 | 6.60 | 1.65 | 10.89 | 8,727 | 8,888 | 7,822 | 68.4 | 40.05 | 7,771 | 7,959 | 7,004 | 13,925 | 12,595 | 66.2 | 35.64 | 0.36 |
| 29 | 2 | N60 | 6.65 | 1.65 | 10.97 | 7,567 | 7,729 | 6,801 | 67 | 35.54 | 6,783 | 6,960 | 6,125 | 12,585 | 11,331 | 66.8 | 35.42 | 0.35 |
| 30 | 2 | N0 | 6.93 | 1.65 | 11.43 | 7,929 | 8,107 | 7,134 | 71.3 | 40.39 | 7,199 | 7,368 | 6,484 | 13,616 | 12,183 | 67.3 | 34.85 | 0.35 |
| 31 | 2 | N90 | 6.40 | 1.65 | 10.56 | 7,030 | 7,211 | 6,345 | 67.3 | 34.24 | 6,367 | 6,525 | 5,742 | 13,154 | 11,952 | 66.5 | 37.11 | 0.32 |
| 32 | 2 | N30 | 6.65 | 1.65 | 10.97 | 7,743 | 7,903 | 6,954 | 70.2 | 38.94 | 7,049 | 7,203 | 6,339 | 13,597 | 12,257 | 68.1 | 36.49 | 0.34 |
| 33 | 3 | N30 | 6.65 | 1.65 | 10.97 | 6,699 | 6,823 | 6,004 | 71.3 | 43.93 | 8,564 | 8,762 | 7,710 | 12,406 | 11,261 | 68.3 | 36.61 | 0.41 |
| 34 | 3 | N0 | 6.70 | 1.65 | 11.06 | 7,624 | 7,790 | 6,855 | 73.4 | 40.06 | 9,674 | 9,910 | 8,721 | 10,934 | 9,802 | 70.8 | 38.69 | 0.47 |
| 35 | 3 | N90 | 6.40 | 1.65 | 10.56 | 7,420 | 7,570 | 6,661 | 68.5 | 37.31 | 8,419 | 8,632 | 7,596 | 12,559 | 11,550 | 69.0 | 36.19 | 0.40 |
| 36 | 3 | N60 | 6.90 | 1.65 | 11.39 | 7,296 | 7,408 | 6,519 | 69.1 | 36.63 | 8,583 | 8,788 | 7,733 | 11,860 | 10,863 | 68.8 | 37.24 | 0.42 |
| 37 | 3 | N120N90 | 3.15 | 1.65 | 5.20 | 7,253 | 7,408 | 6,519 | 70.7 | 38.41 | 3,809 | 3,890 | 3,423 | 10,698 | 9,574 | 67.8 | 34.32 | 0.26 |
| 38 | 3 | N120N60 | 3.40 | 1.65 | 5.61 | 7,357 | 7,533 | 6,629 | 70.1 | 37.06 | 7,714 | 7,891 | 6,944 | 11,491 | 10,426 | 69.8 | 36.71 | 0.40 |
| 39 | 3 | N60N0 | 3.15 | 1.65 | 5.20 | 8,423 | 8,618 | 7,584 | 71.8 | 25.75 | 8,481 | 8,675 | 7,634 | 11,769 | 10,731 | 68.0 | 39.30 | 0.42 |
| 40 | 3 | N150N0 | 2.90 | 1.65 | 4.79 | 7,716 | 7,879 | 6,933 | 70.7 | 38.66 | 6,196 | 6,334 | 5,574 | 12,874 | 11,704 | 68.5 | 35.35 | 0.32 |
| 41 | 3 | N120N30 | 3.20 | 1.65 | 5.28 | 7,775 | 7,957 | 7,002 | 73.6 | 39.95 | 6,711 | 6,872 | 6,048 | 14,729 | 13,347 | 68.7 | 34.54 | 0.31 |
| 42 | 3 | CONTROL | 3.18 | 1.65 | 5.25 | 7,290 | 7,427 | 6,536 | 68 | 36.95 | 7,430 | 7,627 | 6,712 | 12,933 | 11,740 | 66.8 | 34.86 | 0.36 |
| 43 | 3 | N90N0 | 3.60 | 1.65 | 5.94 | 7,079 | 7,247 | 6,377 | 70.2 | 39.19 | 8,371 | 8,579 | 7,550 | 13,142 | 11,967 | 68.2 | 39.56 | 0.39 |
| 44 | 3 | N120N0 | 3.45 | 1.65 | 5.69 | 7,786 | 7,972 | 7,015 | 71.8 | 40.95 | 8,458 | 8,646 | 7,609 | 12,381 | 11,247 | 68.6 | 39.94 | 0.40 |
| 45 | 3 | N0 | 6.55 | 1.65 | 10.81 | 6,425 | 6,566 | 5,778 | 70.2 | 40.28 | 6,595 | 6,764 | 5,953 | 14,634 | 13,314 | 67.1 | 37.13 | 0.31 |
| 46 | 3 | N60 | 6.35 | 1.65 | 10.48 | 9,288 | 9,426 | 8,295 | 72.5 | 39.44 | 7,724 | 7,895 | 6,948 | 13,051 | 11,871 | 66.3 | 32.98 | 0.37 |
| 47 | 3 | N90 | 6.55 | 1.65 | 10.81 | 7,908 | 8,034 | 7,070 | 68.7 | 36.99 | 7,540 | 7,685 | 6,762 | 13,021 | 11,761 | 66.4 | 36.89 | 0.37 |
| 48 | 3 | N30 | 6.10 | 1.65 | 10.07 | 8,822 | 9,028 | 7,945 | 71 | 39.03 | 7,292 | 7,489 | 6,591 | 10,636 | 9,733 | 66.8 | 40.66 | 0.40 |
| 49 | 4 | N60 | 6.50 | 1.65 | 10.73 | 7,915 | 8,068 | 7,100 | 69.9 | 40.49 | 7,209 | 7,410 | 6,521 | 14,804 | 13,479 | 67.1 | 35.58 | 0.33 |
| 50 | 4 | N30 | 6.65 | 1.65 | 10.97 | 7,768 | 7,937 | 6,984 | 69.6 | 36.72 | 6,579 | 6,762 | 5,951 | 12,476 | 11,378 | 66.2 | 33.09 | 0.34 |
| 51 | 4 | N90 | 6.10 | 1.65 | 10.07 | 8,048 | 8,236 | 7,248 | 70.5 | 37.75 | 7,356 | 7,531 | 6,627 | 10,299 | 9,433 | 68.6 | 38.28 | 0.41 |
| 52 | 4 | N0 | 5.90 | 1.65 | 9.74 | 9,888 | 10,080 | 8,871 | 69.6 | 36.67 | 7,924 | 8,112 | 7,138 | 12,144 | 11,076 | 67.6 | 39.75 | 0.39 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|------|-------|------|
| 53 | 4 | N0 | 6.70 | 1.65 | 11.06 | 7,943 | 8,087 | 7,117 | 72.5 | 40.88 | 7,481 | 7,625 | 6,710 | 14,752 | 13,345 | 67.1 | 39.41 | 0.33 |
| 54 | 4 | N90 | 6.45 | 1.65 | 10.64 | 7,571 | 7,721 | 6,795 | 69.2 | 36.65 | 6,199 | 6,344 | 5,583 | 12,246 | 11,057 | 66.9 | 36.31 | 0.34 |
| 55 | 4 | N60 | 6.48 | 1.65 | 10.69 | 8,244 | 8,427 | 7,416 | 70.8 | 37.42 | 7,357 | 7,526 | 6,623 | 13,499 | 12,322 | 67.3 | 37.43 | 0.35 |
| 56 | 4 | N30 | 6.80 | 1.65 | 11.22 | 8,205 | 8,346 | 7,345 | 70.8 | 39.21 | 7,183 | 7,346 | 6,465 | 11,771 | 10,853 | 67.7 | 36.89 | 0.37 |
| 57 | 4 | N120N0 | 2.95 | 1.65 | 4.87 | 7,484 | 7,468 | 6,572 | 69.7 | 39.82 | 6,374 | 6,530 | 5,747 | 14,642 | 13,453 | 64.6 | 30.65 | 0.30 |
| 58 | 4 | CONTROL | 3.23 | 1.65 | 5.33 | 8,254 | 8,461 | 7,446 | 69.3 | 36.70 | 7,768 | 7,937 | 6,984 | 13,491 | 12,116 | 68.5 | 36.99 | 0.37 |
| 59 | 4 | N120N90 | 3.00 | 1.65 | 4.95 | 8,085 | 8,289 | 7,295 | 67.2 | 34.71 | 6,183 | 6,315 | 5,558 | 13,836 | 12,544 | 65.8 | 34.81 | 0.31 |
| 60 | 4 | N60N0 | 3.10 | 1.65 | 5.12 | 8,231 | 8,423 | 7,413 | 68.8 | 38.67 | 6,863 | 7,012 | 6,171 | 14,057 | 12,529 | 67.8 | 34.33 | 0.33 |
| 61 | 4 | N90N0 | 2.98 | 1.65 | 4.92 | 9,351 | 9,561 | 8,413 | 70.6 | 39.71 | 6,062 | 6,207 | 5,463 | 12,657 | 11,567 | 68.0 | 35.43 | 0.32 |
| 62 | 4 | N120N60 | 3.00 | 1.65 | 4.95 | 8,255 | 8,397 | 7,390 | 69.9 | 39.27 | 5,802 | 5,864 | 5,160 | 13,726 | 12,218 | 67.4 | 31.04 | 0.30 |
| 63 | 4 | N120N30 | 3.03 | 1.65 | 5.00 | 8,375 | 8,570 | 7,542 | 68.1 | 40.32 | 8,386 | 8,595 | 7,563 | 13,978 | 12,647 | 68.7 | 35.70 | 0.37 |
| 64 | 4 | N150N0 | 3.45 | 1.65 | 5.69 | 8,181 | 8,373 | 7,368 | 69.9 | 36.49 | 6,838 | 7,002 | 6,162 | 12,888 | 11,550 | 68.1 | 37.07 | 0.35 |

11.3. Anejo 3: Estadísticas básicas zonales

Tabla 1 Anejo 3. Estadísticas básicas zonales

| | Trata-miento | Media NDVI | SD NDVI | Min NDVI | Max NDVI | Media GNDVI | SD GNDVI | Min GNDVI | Max GNDVI | Media RVI | SD RVI | Min RVI | Max RVI | NDRE Media | NDRE Stdev | NDRE Min | NDRE Max | ACP Media | ACP Stdev | ACP Min | ACP Max |
|-----------------|--------------|------------|---------|----------|----------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|--------|---------|---------|------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|---------|---------|
| Metodo-ología 1 | CON-TROL | 0.937 | 0.020 | 0.809 | 0.958 | 0.879 | 0.020 | 0.778 | 0.904 | 33.402 | 6.969 | 10.819 | 46.199 | 0.376 | 0.024 | 0.302 | 0.417 | -0.335 | 0.026 | -0.384 | -0.244 |
| | N60N0 | 0.942 | 0.010 | 0.898 | 0.956 | 0.890 | 0.010 | 0.850 | 0.905 | 35.947 | 4.106 | 23.188 | 45.012 | 0.395 | 0.012 | 0.356 | 0.423 | -0.353 | 0.015 | -0.381 | -0.304 |
| | N90N0 | 0.946 | 0.014 | 0.875 | 0.959 | 0.889 | 0.014 | 0.828 | 0.906 | 37.368 | 6.140 | 18.004 | 48.438 | 0.392 | 0.015 | 0.333 | 0.420 | -0.353 | 0.017 | -0.382 | -0.289 |
| | N120 | 0.947 | 0.009 | 0.890 | 0.959 | 0.892 | 0.010 | 0.845 | 0.906 | 38.433 | 4.791 | 21.437 | 48.316 | 0.395 | 0.012 | 0.350 | 0.419 | -0.356 | 0.017 | -0.387 | -0.293 |
| | N120N0 | 0.946 | 0.009 | 0.891 | 0.958 | 0.890 | 0.010 | 0.845 | 0.904 | 37.351 | 4.309 | 22.127 | 46.885 | 0.388 | 0.013 | 0.340 | 0.413 | -0.355 | 0.017 | -0.386 | -0.288 |
| | N120N30 | 0.944 | 0.016 | 0.831 | 0.960 | 0.887 | 0.015 | 0.800 | 0.905 | 36.745 | 7.110 | 11.321 | 49.303 | 0.385 | 0.015 | 0.326 | 0.415 | -0.349 | 0.022 | -0.386 | -0.264 |
| | N120N60 | 0.950 | 0.007 | 0.917 | 0.960 | 0.896 | 0.007 | 0.864 | 0.908 | 40.422 | 4.055 | 25.668 | 49.793 | 0.402 | 0.010 | 0.367 | 0.423 | -0.360 | 0.014 | -0.390 | -0.307 |
| | N120N90 | 0.949 | 0.006 | 0.922 | 0.959 | 0.896 | 0.007 | 0.869 | 0.908 | 39.213 | 3.690 | 26.634 | 47.282 | 0.403 | 0.011 | 0.367 | 0.423 | -0.360 | 0.013 | -0.386 | -0.311 |
| | N150N0 | 0.948 | 0.007 | 0.895 | 0.959 | 0.892 | 0.007 | 0.848 | 0.903 | 38.823 | 4.334 | 20.841 | 48.635 | 0.390 | 0.010 | 0.352 | 0.411 | -0.354 | 0.016 | -0.386 | -0.295 |
| | N0 | 0.938 | 0.023 | 0.817 | 0.958 | 0.880 | 0.021 | 0.780 | 0.904 | 34.453 | 6.156 | 16.213 | 46.756 | 0.378 | 0.019 | 0.312 | 0.415 | -0.336 | 0.022 | -0.378 | -0.253 |
| | N30 | 0.946 | 0.012 | 0.840 | 0.960 | 0.890 | 0.012 | 0.810 | 0.909 | 37.334 | 5.681 | 12.028 | 48.981 | 0.386 | 0.017 | 0.330 | 0.420 | -0.343 | 0.020 | -0.383 | -0.258 |
| | N60 | 0.946 | 0.016 | 0.823 | 0.961 | 0.891 | 0.015 | 0.792 | 0.908 | 38.290 | 5.923 | 14.245 | 49.952 | 0.387 | 0.016 | 0.319 | 0.422 | -0.343 | 0.020 | -0.383 | -0.257 |
| | N90 | 0.948 | 0.008 | 0.882 | 0.960 | 0.894 | 0.009 | 0.837 | 0.909 | 38.301 | 4.583 | 16.910 | 49.162 | 0.398 | 0.012 | 0.350 | 0.426 | -0.345 | 0.017 | -0.379 | -0.281 |
| | N0 | 0.942 | 0.014 | 0.853 | 0.958 | 0.885 | 0.016 | 0.808 | 0.908 | 34.964 | 5.699 | 15.035 | 47.110 | 0.379 | 0.021 | 0.310 | 0.421 | -0.342 | 0.020 | -0.384 | -0.263 |
| | N30 | 0.939 | 0.026 | 0.756 | 0.960 | 0.879 | 0.024 | 0.732 | 0.903 | 36.128 | 6.990 | 8.155 | 49.518 | 0.376 | 0.019 | 0.302 | 0.412 | -0.336 | 0.022 | -0.381 | -0.243 |
| | N60 | 0.943 | 0.019 | 0.831 | 0.961 | 0.886 | 0.019 | 0.787 | 0.907 | 37.302 | 6.811 | 15.490 | 50.617 | 0.386 | 0.017 | 0.313 | 0.419 | -0.341 | 0.019 | -0.382 | -0.262 |
| | N90 | 0.946 | 0.016 | 0.869 | 0.961 | 0.889 | 0.016 | 0.813 | 0.907 | 38.411 | 6.331 | 17.727 | 51.124 | 0.391 | 0.016 | 0.330 | 0.421 | -0.343 | 0.020 | -0.380 | -0.266 |
| Metodo-ología 2 | CON-TROL | 0.937 | 0.018 | 0.814 | 0.954 | 0.878 | 0.017 | 0.790 | 0.900 | 33.281 | 5.155 | 15.658 | 42.871 | 0.373 | 0.020 | 0.323 | 0.411 | -0.331 | 0.022 | -0.369 | -0.271 |
| | N60N0 | 0.944 | 0.007 | 0.908 | 0.954 | 0.891 | 0.007 | 0.860 | 0.903 | 35.882 | 3.938 | 22.074 | 43.173 | 0.396 | 0.010 | 0.360 | 0.417 | -0.354 | 0.012 | -0.376 | -0.313 |
| | N90N0 | 0.949 | 0.006 | 0.922 | 0.958 | 0.892 | 0.008 | 0.863 | 0.903 | 38.882 | 3.931 | 25.235 | 46.459 | 0.391 | 0.015 | 0.345 | 0.412 | -0.358 | 0.013 | -0.380 | -0.316 |
| | N120 | 0.947 | 0.008 | 0.910 | 0.957 | 0.892 | 0.008 | 0.860 | 0.904 | 38.066 | 4.094 | 24.323 | 45.819 | 0.394 | 0.011 | 0.359 | 0.415 | -0.357 | 0.014 | -0.382 | -0.313 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| | N120N0 | 0.946 | 0.006 | 0.920 | 0.956 | 0.890 | 0.008 | 0.864 | 0.902 | 36.689 | 3.844 | 25.572 | 44.782 | 0.387 | 0.012 | 0.354 | 0.411 | -0.355 | 0.015 | -0.382 | -0.310 |
| | N120N3 0 | 0.944 | 0.014 | 0.878 | 0.958 | 0.887 | 0.013 | 0.830 | 0.901 | 37.234 | 5.328 | 20.075 | 47.155 | 0.382 | 0.015 | 0.332 | 0.409 | -0.350 | 0.016 | -0.376 | -0.298 |
| | N120N6 0 | 0.950 | 0.006 | 0.922 | 0.958 | 0.897 | 0.006 | 0.875 | 0.906 | 40.002 | 3.777 | 26.753 | 46.912 | 0.403 | 0.009 | 0.377 | 0.419 | -0.365 | 0.012 | -0.387 | -0.324 |
| | N120N9 0 | 0.948 | 0.006 | 0.919 | 0.956 | 0.896 | 0.006 | 0.871 | 0.906 | 38.340 | 3.425 | 24.891 | 44.426 | 0.404 | 0.009 | 0.375 | 0.422 | -0.359 | 0.013 | -0.382 | -0.319 |
| | N150N0 | 0.948 | 0.006 | 0.922 | 0.958 | 0.890 | 0.008 | 0.863 | 0.902 | 38.782 | 3.887 | 27.038 | 47.087 | 0.390 | 0.010 | 0.360 | 0.408 | -0.356 | 0.015 | -0.385 | -0.311 |
| | N0 | 0.944 | 0.009 | 0.893 | 0.956 | 0.884 | 0.010 | 0.843 | 0.901 | 35.425 | 4.515 | 18.901 | 44.241 | 0.377 | 0.017 | 0.326 | 0.410 | -0.339 | 0.018 | -0.374 | -0.269 |
| | N30 | 0.950 | 0.005 | 0.926 | 0.958 | 0.894 | 0.006 | 0.871 | 0.905 | 39.347 | 3.705 | 27.082 | 47.210 | 0.387 | 0.012 | 0.354 | 0.412 | -0.350 | 0.014 | -0.381 | -0.306 |
| | N60 | 0.950 | 0.006 | 0.915 | 0.959 | 0.894 | 0.008 | 0.855 | 0.907 | 39.766 | 4.051 | 23.243 | 47.563 | 0.392 | 0.013 | 0.352 | 0.418 | -0.348 | 0.013 | -0.372 | -0.300 |
| | N90 | 0.949 | 0.006 | 0.907 | 0.958 | 0.895 | 0.006 | 0.861 | 0.904 | 38.475 | 3.415 | 23.667 | 46.177 | 0.397 | 0.010 | 0.351 | 0.417 | -0.346 | 0.012 | -0.373 | -0.307 |
| | N0 | 0.943 | 0.007 | 0.898 | 0.955 | 0.884 | 0.011 | 0.839 | 0.903 | 34.545 | 3.954 | 19.965 | 43.585 | 0.373 | 0.019 | 0.326 | 0.411 | -0.341 | 0.016 | -0.373 | -0.287 |
| | N30 | 0.946 | 0.010 | 0.880 | 0.958 | 0.884 | 0.012 | 0.819 | 0.900 | 36.958 | 4.904 | 19.113 | 46.353 | 0.377 | 0.014 | 0.329 | 0.403 | -0.342 | 0.016 | -0.377 | -0.283 |
| | N60 | 0.947 | 0.008 | 0.891 | 0.958 | 0.889 | 0.009 | 0.840 | 0.903 | 37.621 | 4.768 | 18.600 | 46.988 | 0.388 | 0.011 | 0.344 | 0.411 | -0.346 | 0.013 | -0.375 | -0.289 |
| | N90 | 0.949 | 0.007 | 0.905 | 0.958 | 0.892 | 0.006 | 0.854 | 0.902 | 38.923 | 3.990 | 21.276 | 46.445 | 0.390 | 0.010 | 0.348 | 0.412 | -0.345 | 0.012 | -0.370 | -0.298 |
| Metodo- ología 3 | CON- TROL | 0.939 | 0.019 | 0.809 | 0.958 | 0.882 | 0.020 | 0.778 | 0.904 | 34.358 | 7.007 | 10.819 | 46.199 | 0.379 | 0.025 | 0.303 | 0.417 | -0.338 | 0.027 | -0.384 | -0.248 |
| | N60N0 | 0.946 | 0.005 | 0.925 | 0.956 | 0.893 | 0.006 | 0.870 | 0.905 | 37.032 | 3.249 | 26.711 | 45.012 | 0.398 | 0.010 | 0.367 | 0.423 | -0.357 | 0.011 | -0.381 | -0.323 |
| | N90N0 | 0.950 | 0.005 | 0.927 | 0.959 | 0.894 | 0.006 | 0.868 | 0.906 | 39.719 | 3.521 | 28.214 | 48.215 | 0.396 | 0.011 | 0.357 | 0.420 | -0.358 | 0.012 | -0.382 | -0.314 |
| | N120 | 0.949 | 0.007 | 0.901 | 0.959 | 0.894 | 0.008 | 0.853 | 0.906 | 39.104 | 4.346 | 22.939 | 48.302 | 0.396 | 0.011 | 0.357 | 0.419 | -0.359 | 0.014 | -0.387 | -0.304 |
| | N120N0 | 0.948 | 0.006 | 0.905 | 0.958 | 0.892 | 0.007 | 0.857 | 0.904 | 38.040 | 3.747 | 23.347 | 46.885 | 0.390 | 0.012 | 0.353 | 0.413 | -0.357 | 0.014 | -0.386 | -0.306 |
| | N120N3 0 | 0.946 | 0.014 | 0.845 | 0.960 | 0.889 | 0.013 | 0.807 | 0.904 | 37.852 | 6.470 | 12.623 | 49.303 | 0.387 | 0.014 | 0.331 | 0.415 | -0.353 | 0.020 | -0.386 | -0.269 |
| | N120N6 0 | 0.952 | 0.005 | 0.932 | 0.960 | 0.898 | 0.005 | 0.879 | 0.908 | 41.227 | 3.506 | 29.104 | 49.740 | 0.404 | 0.008 | 0.377 | 0.423 | -0.363 | 0.011 | -0.390 | -0.326 |
| | N120N9 0 | 0.949 | 0.006 | 0.922 | 0.959 | 0.896 | 0.007 | 0.869 | 0.908 | 39.298 | 3.660 | 26.681 | 47.282 | 0.403 | 0.011 | 0.367 | 0.423 | -0.362 | 0.013 | -0.386 | -0.317 |
| | N150N0 | 0.950 | 0.006 | 0.906 | 0.959 | 0.893 | 0.006 | 0.851 | 0.903 | 39.516 | 3.793 | 23.131 | 48.243 | 0.392 | 0.009 | 0.362 | 0.411 | -0.358 | 0.013 | -0.385 | -0.311 |
| | N0 | 0.946 | 0.006 | 0.914 | 0.958 | 0.888 | 0.008 | 0.853 | 0.904 | 36.729 | 3.802 | 23.253 | 46.484 | 0.384 | 0.016 | 0.331 | 0.415 | -0.345 | 0.015 | -0.378 | -0.286 |
| | N30 | 0.948 | 0.008 | 0.879 | 0.960 | 0.893 | 0.009 | 0.837 | 0.909 | 38.537 | 4.696 | 16.907 | 48.981 | 0.389 | 0.016 | 0.336 | 0.420 | -0.347 | 0.017 | -0.383 | -0.269 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| | N60 | 0.951 | 0.005 | 0.913 | 0.961 | 0.895 | 0.007 | 0.862 | 0.908 | 40.163 | 3.839 | 23.094 | 49.952 | 0.392 | 0.013 | 0.340 | 0.422 | -0.348 | 0.015 | -0.383 | -0.300 |
| | N90 | 0.950 | 0.005 | 0.914 | 0.960 | 0.897 | 0.005 | 0.863 | 0.909 | 39.652 | 3.276 | 23.710 | 49.162 | 0.401 | 0.010 | 0.362 | 0.426 | -0.350 | 0.013 | -0.378 | -0.309 |
| | N0 | 0.946 | 0.007 | 0.916 | 0.958 | 0.890 | 0.010 | 0.854 | 0.908 | 36.824 | 4.287 | 23.081 | 47.110 | 0.384 | 0.019 | 0.331 | 0.421 | -0.348 | 0.016 | -0.384 | -0.296 |
| | N30 | 0.947 | 0.010 | 0.822 | 0.960 | 0.887 | 0.010 | 0.787 | 0.903 | 38.137 | 5.215 | 10.936 | 49.518 | 0.382 | 0.014 | 0.328 | 0.412 | -0.343 | 0.016 | -0.381 | -0.269 |
| | N60 | 0.950 | 0.006 | 0.910 | 0.961 | 0.892 | 0.008 | 0.851 | 0.907 | 39.305 | 4.378 | 23.292 | 50.617 | 0.389 | 0.013 | 0.343 | 0.419 | -0.346 | 0.014 | -0.382 | -0.298 |
| | N90 | 0.951 | 0.005 | 0.926 | 0.961 | 0.895 | 0.006 | 0.868 | 0.907 | 40.687 | 3.769 | 26.767 | 51.124 | 0.396 | 0.012 | 0.353 | 0.421 | -0.349 | 0.014 | -0.380 | -0.301 |

11.4. Anejo 4: Script R correlación de Índices de Vegetación

#Se crea un directorio para almacenar ahí las distintas capas raster.

#En este caso creamos la carpeta en c:/carpeta_indices y esta contiene ahí las cuatro imágenes a utilizar.

#El comando utilizado para indicar el directorio es el siguiente:

```
setwd("c:/carpeta_indices")
```

#El siguiente paso es indicar que se haga un listado de archivos con los que se encuentran en el directorio. Se ejecuta con archivos tif que presenten la misma proyección y que presenten la misma dimensión.

```
list_tif=list.files("./",pattern=".tif$")
```

#Para generarla es necesario la utilización de bibliotecas que faciliten la realización del script.

```
library(raster)
```

```
library(sp)
```

#El formato para proceder a la lectura de cada uno de los índices se pone lo siguiente:

```
tif1 = raster(paste("./",list_tif[1],sep="")) #leer índice 1
```

```
tif2 = raster(paste("./",list_tif[2],sep="")) #leer índice 2
```

```
tif3 = raster(paste("./",list_tif[3],sep="")) #leer índice 3
```

```
tif4 = raster(paste("./",list_tif[4],sep="")) #leer índice 4
```

#El siguiente paso es convertir los índices a matriz de datos. Ponemos na.rm=true para que marque que existen valores nulos

```
dataframe1 = as.data.frame(tif1, row.names=NULL, optional=FALSE, xy=FALSE, na.rm=TRUE, long=FALSE)
```

```
dataframe2 = as.data.frame(tif2, row.names=NULL, optional=FALSE, xy=FALSE, na.rm=TRUE, long=FALSE)
```

```
dataframe3 = as.data.frame(tif3, row.names=NULL, optional=FALSE, xy=FALSE, na.rm=TRUE, long=FALSE)
```

```
dataframe4 = as.data.frame(tif4, row.names=NULL, optional=FALSE, xy=FALSE, na.rm=TRUE, long=FALSE)
```

#La correlación se realiza mediante los dataframe, mediante el comando cor realizando así la correlación de Pearson. Esta correlación siempre se realiza entre el dataframe 1 (índice NDVI) y otro dataframe (GNDVI, RVI Y NDRE).

```
correlacion_1_2 = cor(dataframe1,dataframe2) #correlación entre índice 1 y 2
```

```
correlacion_1_3 = cor(dataframe1,dataframe3) #correlación entre índice 1 y 3
```

```
correlacion_1_4 = cor(dataframe1,dataframe4) #correlación entre índice 1 y 4
```

#Por último, una vez realizada la correlación, para que visualice el resultado ponemos lo siguiente:

```
correlacion_1_2
```

```
correlacion_1_3
```

```
correlacion_1_4
```

11.5. Anejo 5: Script R y resultados estadísticas de T de Student

#Primero creamos un directorio del cual se van a tomar los datos. En este caso la cargamos en la carpeta C:/

```
setwd("c:/prueba")
```

#Lo siguiente es la lectura del documento txt para convertirlo así en una matriz y poder realizar posteriormente el test. Hay que poner que tiene encabezado, que separe por tabulaciones y que la división decimal es de , por ello se pone el comando de la siguiente forma:

```
datos<-read.table("T.txt",sep="\t",header=TRUE, dec=".")
```

#el comando head muestra como quedaría representada la tabla en formato de matriz

```
head(datos)
```

#El comando utilizado para realizar el test de T-Student es el siguiente:

```
t.test(datos$NDVI1,datos$NDVI2, paired=TRUE)
t.test(datos$NDVI1,datos$NDVI3, paired=TRUE)
t.test(datos$NDVI2,datos$NDVI3, paired=TRUE)
t.test(datos$GNDVI1,datos$GNDVI2, paired=TRUE)
t.test(datos$GNDVI1,datos$GNDVI3, paired=TRUE)
t.test(datos$GNDVI2,datos$GNDVI3, paired=TRUE)
t.test(datos$RVI1,datos$RVI2, paired=TRUE)
t.test(datos$RVI1,datos$RVI3, paired=TRUE)
t.test(datos$RVI2,datos$NDVI3, paired=TRUE)
t.test(datos$NDRE1,datos$NDRE2, paired=TRUE)
t.test(datos$NDRE1,datos$NDRE3, paired=TRUE)
t.test(datos$NDRE2,datos$NDRE3, paired=TRUE)
t.test(datos$CP11,datos$CP12, paired=TRUE)
t.test(datos$CP11,datos$CP13, paired=TRUE)
t.test(datos$CP12,datos$CP13, paired=TRUE)
```

Tabla 1-15 Anejo 5: Valores entre variables del T de Student.

| Metodologías NDVI | 1 | 2 | Metodologías NDVI | 1 | 3 | Metodologías NDVI | 2 | 3 |
|---------------------------------------|----------------------|----------------|---|--------------------|----------------|---|--------------------|----------------|
| | Variable 1 | Variable 2 | | Variable 1 | Variable 2 | | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | 0.9446221 68 | 0.946549 07 | Media Varianza Observaciones Coeficiente de correlación de Pearson Diferencia hipotética de las medias Grados de libertad Estadístico t P($T \leq t$) una cola Valor crítico de t (una cola) P($T \leq t$) dos colas Valor crítico de t (dos colas) | 0.944622 17 | 0.948210 18 | Coeficiente de correlación de Pearson Diferencia hipotética de las medias Grados de libertad Estadístico t P($T \leq t$) una cola Valor crítico de t (una cola) P($T \leq t$) dos colas Valor crítico de t (dos colas) | 0.946549 07 | 0.948210 18 |
| Varianza | 1.46969E-05 | 1.2041E-05 | | 1.4697E-05 | 8.6754E-06 | | 1.2041E-05 | 8.6754E-06 |
| Observaciones | 17 | 17 | | 17 | 17 | | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.8089322 25 | | | 0.777289 44 | | | 0.954497 57 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | | | 0 | | | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | | | 16 | | | 16 | |
| Estadístico t | - 3.4787691 42 | | | - 6.132979 9 | | | - 6.238064 9 | |
| P($T \leq t$) una cola | 0.0015497 26 | | | 7.2116E-06 | | | 5.9282E-06 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.7458836 69 | | | 1.745883 67 | | | 1.745883 67 | |
| P($T \leq t$) dos colas | 0.0030994 52 | | | 1.4423E-05 | | | 1.1856E-05 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.1199052 85 | | | 2.119905 29 | | | 2.119905 29 | |

| Metodologías GNDVI | 1 | 2 |
|---------------------------------------|----------------------|----------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | 0.8885752 29 | 0.889936 72 |
| Varianza | 2.73235E-05 | 2.5728E-05 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.9342511 12 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | - 2.9960961 86 | |
| P(T<=t) una cola | 0.0042744 14 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.7458836 69 | |
| P(T<=t) dos colas | 0.0085488 27 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.1199052 85 | |

| Metodologías GNDVI | 1 | 3 |
|---------------------------------------|--------------------|----------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | 0.888575 23 | 0.892130 53 |
| Varianza | 2.7323E-05 | 1.6241E-05 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.912634 41 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | - 6.482080 9 | |
| P(T<=t) una cola | 3.783E-06 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.745883 67 | |
| P(T<=t) dos colas | 7.566E-06 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.119905 29 | |

| Metodologías GNDVI | 2 | 3 |
|---------------------------------------|--------------------|----------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | 0.889936 72 | 0.892130 53 |
| Varianza | 2.5728E-05 | 1.6241E-05 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.965492 18 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | - 5.723908 1 | |
| P(T<=t) una cola | 1.5686E-05 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.745883 67 | |
| P(T<=t) dos colas | 3.1371E-05 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.119905 29 | |

| Metodologías RVI | 1 | 2 |
|---------------------------------------|----------------------|----------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | 37.228718 49 | 37.54234 49 |
| Varianza | 3.2760021 9 | 3.551250 7 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.9016304 3 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | - 1.5720688 88 | |
| P(T<=t) una cola | 0.0677490 61 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.7458836 69 | |
| P(T<=t) dos colas | 0.1354981 22 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.1199052 85 | |

| Metodologías RVI | 1 | 3 |
|---------------------------------------|--------------------|----------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | 37.22871 85 | 38.59887 45 |
| Varianza | 3.276002 19 | 2.895930 09 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.924406 64 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | - 8.176359 1 | |
| P(T<=t) una cola | 2.0871E- 07 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.745883 67 | |
| P(T<=t) dos colas | 4.1743E- 07 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.119905 29 | |

| Metodologías RVI | 2 | 3 |
|---------------------------------------|--------------------|----------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | 37.54234 49 | 38.59887 45 |
| Varianza | 3.551250 7 | 2.895930 09 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.938167 14 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | - 6.643315 5 | |
| P(T<=t) una cola | 2.8241E- 06 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.745883 67 | |
| P(T<=t) dos colas | 5.6481E- 06 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.119905 29 | |

| Metodologías NDRE | 1 | 2 |
|---------------------------------------|-----------------|----------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | 0.3887184 17 | 0.388322 84 |
| Varianza | 7.02837E-05 | 8.8903E-05 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.9670631 14 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | 0.6498145 67 | |
| P(T<=t) una cola | 0.2625162 47 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.7458836 69 | |
| P(T<=t) dos colas | 0.5250324 93 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.1199052 85 | |

| Metodologías NDRE | 1 | 3 |
|---------------------------------------|--------------------|----------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | 0.388718 42 | 0.391807 91 |
| Varianza | 7.0284E-05 | 5.6266E-05 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.986450 2 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | - 8.084127 9 | |
| P(T<=t) una cola | 2.4202E-07 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.745883 67 | |
| P(T<=t) dos colas | 4.8404E-07 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.119905 29 | |

| Metodologías NDRE | 2 | 3 |
|---------------------------------------|--------------------|----------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | 0.388322 84 | 0.391807 91 |
| Varianza | 8.8903E-05 | 5.6266E-05 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.962926 97 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | - 4.800369 4 | |
| P(T<=t) una cola | 9.809E-05 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.745883 67 | |
| P(T<=t) dos colas | 0.000196 18 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.119905 29 | |

| Metodologías ACP1 | 1 | 2 |
|---------------------------------------|----------------------|--------------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | - 0.3472985 75 | - 0.349544 1 |
| Varianza | 7.09229E- 05 | 7.2312E- 05 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.9456978 06 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | 3.3184623 32 | |
| P(T<=t) una cola | 0.0021734 38 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.7458836 69 | |
| P(T<=t) dos colas | 0.0043468 77 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.1199052 85 | |

| Metodologías ACP1 | 1 | 3 |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | - 0.347298 6 | - 0.351752 8 |
| Varianza | 7.0923E- 05 | 5.1619E- 05 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.986334 62 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | 10.29264 93 | |
| P(T<=t) una cola | 9.1804E- 09 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.745883 67 | |
| P(T<=t) dos colas | 1.8361E- 08 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.119905 29 | |

| Metodologías ACP1 | 2 | 3 |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Media | - 0.349544 1 | - 0.351752 8 |
| Varianza | 7.2312E- 05 | 5.1619E- 05 |
| Observaciones | 17 | 17 |
| Coeficiente de correlación de Pearson | 0.960100 92 | |
| Diferencia hipotética de las medias | 0 | |
| Grados de libertad | 16 | |
| Estadístico t | 3.540637 73 | |
| P(T<=t) una cola | 0.001359 89 | |
| Valor crítico de t (una cola) | 1.745883 67 | |
| P(T<=t) dos colas | 0.002719 77 | |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.119905 29 | |

11.6. Anejo 6: Script R correlación datos de producción

#Primero creamos un directorio del cual se van a tomar los datos. En este caso la cargamos en la carpeta C:/

setwd("c:/prueba")

#Lo siguiente es la lectura del documento txt para convertirlo en una matriz para poder realizar posteriormente la regresión lineal. Hay que marcar que tiene encabezado, que separe por tabulaciones y que la división decimal es de ,.

datos<-read.table("metodologia1.txt",sep="\t",header=TRUE, dec=".")

#el comando head muestra como quedaría representada la tabla en formato de matriz

head(datos)

#Primero realizamos una correlación básica para observar cómo se comportan las distintas variables del documento para así coger aquellas variables con una mayor correlación.

cor(datos)

#Una vez observados los datos de correlación se pueden observar los distintos gráficos de dispersión para así hacerse a una pequeña idea de la dispersión

plot(datos)

#Ya generada la correlación básica se genera la regresión lineal de los distintos aspectos agronómicos con los índices de vegetación y el componente principal.

#El comando que se realiza para la regresión lineal debido a que el valor de r2 no varía en gran cantidad de un tipo de regresión a otro.

c1<-lm(datos\$Prodsinhum ~ datos\$NDVI)

#Para observar sus datos se pone lo siguiente:

summary(c1)

c2<-lm(datos\$Prodsinhum ~ datos\$GNDVI)

summary(c2)

c3<-lm(datos\$Prodsinhum ~ datos\$RVI)

summary(c3)

c4<-lm(datos\$Prodsinhum ~ datos\$NDRE)

summary(c4)

c5<-lm(datos\$Prodsinhum ~ datos\$CP1)

summary(c5)

c6<-lm(datos\$Peso ~ datos\$NDVI)

summary(c6)

c7<-lm(datos\$Peso ~ datos\$GNDVI)

summary(c7)

c8<-lm(datos\$Peso ~ datos\$RVI)

summary(c8)

c9<-lm(datos\$Peso~ datos\$NDRE)

```
summary(c9)
c10<-lm(datos$Peso ~ datos$CP1)
summary(c10)
c11<-lm(datos$Paja ~ datos$NDVI)
summary(c11)
c12<-lm(datos$Paja~ datos$GNDVI)
summary(c12)
c13<-lm(datos$Paja ~ datos$RVI)
summary(c13)
c14<-lm(datos$Paja ~ datos$NDRE)
summary(c14)
c15<-lm(datos$Paja ~ datos$CP1)
summary(c15)
c16<-lm(datos$Indice ~ datos$NDVI)
summary(c16)
c17<-lm(datos$Indice ~ datos$GNDVI)
summary(c17)
c18<-lm(datos$Indice ~ datos$RVI)
summary(c18)
c19<-lm(datos$Indice ~ datos$NDRE)
summary(c19)
c20<-lm(datos$Indice ~ datos$CP1)
summary(c20)
#Una vez generado los datos se puede representar como se distribuyen cada uno de ellos de la siguiente forma.
#por ejemplo la primera regresión
plot(NDVI~Prodsinhum,data=datos)
```