

Incorporación de imágenes aéreas en el manejo del cultivo del maíz

C. Portero¹, M. Mercadal¹, P. Salas¹

¹ SONEA Ingeniería y Medio Ambiente. Parque Tecnológico WALQA. Edificio Servicios Generales. Ctra. Zaragoza N330 Km. 566, 22.197 Cuarte (Huesca).

cportero@soneaingenieria.com, psalas@soneaingenieria.com

RESUMEN: La agricultura actual necesita realizar un manejo adecuado de los recursos para incrementar la rentabilidad de los cultivos y la sostenibilidad del sector. Factores como la inestabilidad del mercado, los elevados gastos que conlleva la producción de ciertos cultivos, o el elevado precio de los inputs agrícolas, obligan a los productores a usar de manera más eficiente los recursos y para ello, en muchos casos, a incorporar nuevas tecnologías en su gestión.

Actualmente, la teledetección comienza a ser considerada, no solo por el sector público y científico, sino también por el sector privado, como una herramienta de gran utilidad para el control, seguimiento y gestión de los recursos agrícolas. Este hecho se ha visto favorecido por la eclosión de los UAVs y su repercusión mediática en los últimos años, que ha provocado que la mayoría de la población conozca de la existencia de esta tecnología y sus amplias posibilidades.

Los agricultores cada día están más concienciados de que necesitan incorporar las tecnologías a su trabajo para mejorar la eficiencia de sus explotaciones, y muestra de ello es el uso ya extendido de ciertos dispositivos o sistemas, como el GPS, en la denominada agricultura de precisión. Sin embargo, el uso de la teledetección todavía no está asentado en el sector. Se precisa de unos productos y paquetes de servicios basados en esta técnica que respondan a sus necesidades y posibilidades.

La creación de estos productos y servicios debe comenzar con una recopilación de experiencias en las que se usan imágenes aéreas obtenidas a partir de sensores a bordo de vehículos tripulados y/o no tripulados. Esta revisión permitirá la identificación de los productos y procesos con mayor potencial de desarrollo y estandarización.

En este trabajo se presentan experiencias en el cultivo del maíz. La elección de este cultivo se ha realizado al considerar aspectos socioeconómicos como la rentabilidad de su cultivo y superficie que ocupa.

Palabras-clave: Agricultura, Teledetección aérea, Maíz, UAV.

1. INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones de la teledetección en agricultura son múltiples y variadas utilizándose entre otros, en la identificación, cartografía y seguimiento de cultivos, determinación de variables biofísicas, estimación de biomasa y rendimiento, detección de estreses biótico y abiótico, predicción del contenido de nitrógeno, reconocimiento y seguimiento de áreas regadas, caracterización de las necesidades hídricas de los cultivos, estudio de impactos ambientales, etc. Diferentes ejemplos de su uso en agricultura y regadío se pueden encontrar en Moran et al., 1997; Bastiaanssen et al., 2000; Ozdogan et al., 2010; Atzberger, 2013.

En cuanto a la teledetección aérea se refiere y más concretamente a los UAVs, es en los últimos años cuando más se ha avanzado, sobre todo en el ámbito de la investigación (Zang et al., 2012; Huang et al., 2013; Salami et al., 2014, Shahbazi et al., 2014). Detección de estrés hídrico, plagas y enfermedades, malas hierbas; seguimiento del cultivo, estado nutricional, determinación de biomasa y rendimiento, caracterización del suelo, etc. son algunas de las aplicaciones agrícolas que se están desarrollando (Yue et al., 2012; Calderón et al., 2013; Peña et al., 2013; Bellvert et al., 2014), aunque predominantemente de forma experimental.

Actualmente existen múltiples entidades y empresas dedicadas al desarrollo y manejo de la tecnología necesaria para llevar a cabo servicios basados en la teledetección, siendo especialmente importante la aparición de nuevas empresas relacionadas con los UAVs en los últimos dos años. Las imágenes aéreas que se obtienen a partir de UAVs o de aviones, ofrecen ciertas ventajas respecto a los satélites relacionadas con la elevada resolución espacial y temporal de los datos recogidos, la disponibilidad de información en el momento oportuno, o la posibilidad de realizar estudios multitemporales entre otros, y por ello los usos

potenciales son variados y numerosos.

Sin embargo, hasta el momento, no se ha dado con la clave para generar la demanda tecnológica que se esperaba en el campo de la agricultura. Tras un periodo de estudio, se puede confirmar que uno de los principales motivos es la falta de un paso clave en el proceso de puesta en el mercado de servicios basados en la teledetección aérea, que comprende desde la definición de los segmentos de clientes potenciales y sus necesidades, hasta el desarrollo de procesos y modelos que permitan la paquetización de los servicios.

La creación de los productos y servicios comentados debe comenzar con una recopilación de experiencias en las que se usan imágenes aéreas obtenidas a partir de sensores a bordo de vehículos tripulados y/o no tripulados. Así, el objetivo general de esta comunicación es conocer estas experiencias con aplicación en el cultivo del maíz, como primer paso en la identificación de productos y procesos con mayor potencial de desarrollo y estandarización. Este documento pretende ser una revisión descriptiva¹ de trabajos que se pueden encontrar en la literatura científica así como de experiencias significativas del uso de imágenes aéreas en el cultivo del maíz.

Se ha seleccionado el cultivo de maíz como objeto de esta revisión ya que se trata de uno de los principales cultivos a nivel mundial con una producción total de poco más de mil millones de toneladas en 2013 (1.018.111.958,31 t) (FAO). Según las últimas estadísticas de la FAO que datan de 2013, el país con más superficie dedicada a este cultivo es China (36.339.411 ha), seguido de cerca por Estados Unidos (35.478.012 ha). Otros países a destacar son Brasil, Méjico, Argentina, India e Indonesia. España ocupa el puesto 52 en el ranking de superficie a nivel mundial, pero el 15 en el ámbito de Europa. Sin embargo, en términos de rendimientos, asciende al tercer puesto europeo.

La Comunidad Autónoma de Aragón es la segunda región en España en cuanto a superficie dedicada al cultivo del maíz. Este cultivo puede considerarse como tradicional en sus regadíos tanto por superficie que ocupa como por los ingresos que genera a los agricultores. Estos ingresos alcanzaron un máximo beneficio en 2007 (618 euros por hectárea) aunque en las dos últimas campañas (2013 y 2014) esas cifras son sustancialmente menores debido a la fluctuación de los precios y a una bajada en la producción.

La Tabla 1 muestra la evolución de superficie ocupada por el cultivo de maíz en Aragón durante los últimos 10 años. Estas cifras no incluyen la superficie correspondiente al maíz sembrado como segunda cosecha ya que dichos datos no son recogidos en las estadísticas oficiales. Por ejemplo, en la pasada campaña se estima que la superficie de maíz en Aragón rondó las 100.000 hectáreas. Estas hectáreas generaron una producción estimada de 1.008.000 toneladas de maíz, con un valor de producción de 171,36 millones de euros y un movimiento económico aproximado en Aragón de unos 330,96 millones de euros (Gutiérrez, 2015).

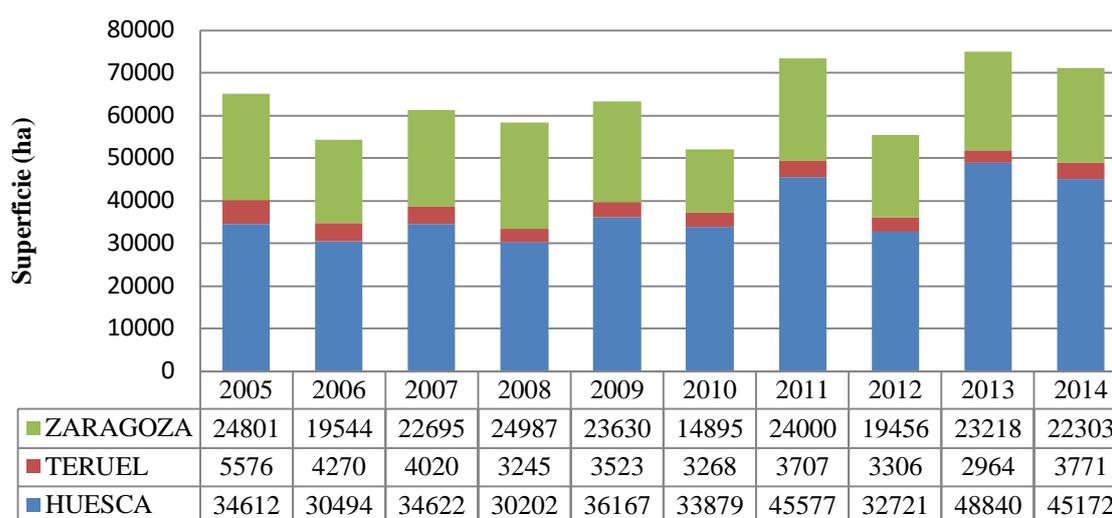


Figura 1. Superficie de maíz en Aragón en ha. Período 2005-2014. (Gutiérrez, 2015)

¹ La revisión descriptiva proporciona una puesta al día sobre conceptos útiles en áreas en constante evolución (Merino-Trujillo, 2011).

En este cultivo, el uso de la teledetección resulta especialmente interesante ya que, llegado a un cierto tamaño de planta, la entrada a la parcela resulta complicada dificultando la identificación de afecciones en su interior. Por otra parte, los costes de producción para este cultivo son elevados por lo que, en explotaciones de grandes extensiones, un pequeño ahorro por hectárea supone un aumento en el beneficio económico, haciendo la técnica más interesante al productor.

2. METODOLOGÍA

La estrategia de búsqueda, se ha basado fundamentalmente en búsquedas en la base de datos bibliográfica *Scopus* y en *Google Academic*. Las propias páginas web de los grupos de investigación que han trabajado en la materia, así como las publicaciones a las que se hace referencia en los artículos encontrados por estas vías, también han sido usadas como fuente de información. A través del buscador *Google* se han encontrado otro tipo de experiencias fuera del ámbito de la investigación.

Los artículos analizados en esta revisión fueron seleccionados en base a los siguientes criterios:

- Que el sistema proporcionara una imagen aérea. Principalmente la plataforma del sistema principal de adquisición de datos debía estar compuesta por un UAV o por una avioneta tripulada.
- Que el cultivo con el que se trabajara fuera el maíz.
- Que el estudio no se centrara únicamente en la calibración de imágenes, elaboración de modelos digitales de superficie por fotogrametría y/o interpretación visual de las imágenes, o de puesta a punto de un sistema UAV. Además, se debía proponer y evaluar una cadena de procesamiento.
- Que el estudio se realizara en el siglo XXI, lo que refleja reciente desarrollo.
- Se desestimaron los artículos publicados en idioma chino.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fruto de esta revisión, se ha observado que en el cultivo del maíz se ha trabajado, durante el periodo considerado, fundamentalmente en los siguientes campos:

3.1. Detección de malas hierbas

Las malas hierbas que proliferan en las parcelas agrícolas suponen un grave problema para los productores, ya que suelen interferir en el normal crecimiento de los cultivos, traduciéndose en un descenso en el rendimiento de producción. Por tanto, el control de las malas hierbas es una actividad fundamental en la agricultura si se desea obtener cosechas y rendimientos adecuados.

Uno de los grupos de investigación que más ha trabajado a nivel mundial en tema de detección de malas hierbas mediante técnicas de teledetección aérea, es el grupo “Agricultura de precisión y malherbología” del Instituto de Agricultura Sostenible del CSIC (Centro Superior de Investigaciones Científicas) en Córdoba (España). Así queda patente en la Figura 2 que muestra el número de publicaciones registradas en *Scopus* que se obtienen con los términos “remote sensing”, “weeds” y “aerial images”, por afiliación.

Este grupo tiene numerosas publicaciones de cartografía de malas hierbas en época tardía mediante imágenes remotas tomadas con aviones tripulados (Peña-Barragán et al., 2011; de Castro et al., 2012), incluso con satélites (Martín et al., 2011; de Castro et al., 2013). Sin embargo, el uso de dichas imágenes plantea ciertas limitaciones para la detección de malas hierbas en época temprana, que es el momento recomendado en muchos cultivos y, entre ellos, el maíz, para realizar los tratamientos herbicidas y obtener un control óptimo de la afección. Peña et al (2014a) establecen que la discriminación de malas hierbas en fase temprana con técnicas de teledetección requiere imágenes remotas de muy elevada resolución espacial (píxeles <5 cm) presentando los UAVs como la única plataforma que en estos momentos pueden alcanzar estas resoluciones.

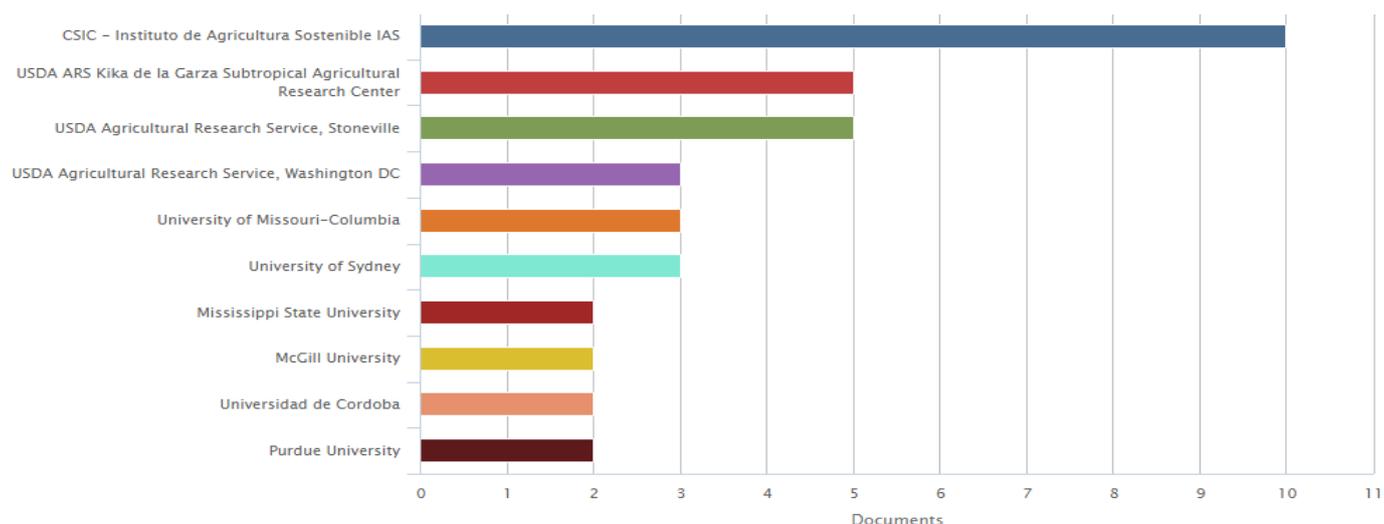


Figura 2. Publicaciones por afiliación en materia de malas hierbas e imágenes aéreas en *Scopus* en los 15 últimos años (resultados abril 2015).

Peña y colaboradores validan el uso de UAVs para la detección temprana de malas hierbas en maíz a través de varias publicaciones (Torres-Sánchez et al., 2015; Peña et al., 2014b; Peña et al., 2014c; Peña et al., 2013; Peña-Barragán et al., 2012). En estas experiencias se usan datos multiespectrales en el visible y en el infrarrojo cercano.

El procedimiento de análisis de imagen utilizado en estos casos consta de tres fases:

- 1) Segmentación de la imagen,
- 2) Clasificación, y
- 3) Evaluación del mapa.

Se obtiene un mapa de infestación de los campos de tres categorías que se utilizará como base para la posterior aplicación herbicida. La fiabilidad del mapa final es superior al 85%. Dorado y Fernández-Quintanilla (2014), estiman que con la aplicación de producto sólo en los lugares con presencia de mala hierba, se alcanzan disminuciones de entre el 65% y el 83% en la cantidad de herbicida aplicado.

La detección temprana de malas hierbas utilizando imágenes aéreas está muy desarrollada a nivel investigación. Estos estudios indican que resulta rentable para infestaciones que van del 5 al 40%. Sin embargo, hoy por hoy, no resulta económicamente rentable realizar un tratamiento diferenciado en infestaciones superiores al 40%, aunque el beneficio medioambiental en estos casos siga resultando tan interesante como para usar esta tecnología.

Por otra parte, Dorado y Fernández-Quintanilla (2014), indican que los tratamientos en base a mapas son los más utilizados, aunque presentan otra forma de aplicación: la aplicación a tiempo real, que consiste en pulverizar las malas hierbas inmediatamente tras su detección. En este tipo de aplicación es donde se concentran los mayores esfuerzos en investigación actualmente. Un ejemplo de esta línea de trabajo es la experiencia de Cambra et al. (2015) en la que se utiliza un sistema de vídeo montado sobre un UAV para la detección a tiempo real de las malas hierbas en un campo de maíz.

3.2. Variables biofísicas

La obtención de parámetros biofísicos a partir de información proveniente de sensores remotos permitirá dar seguimiento a la dinámica espacio-temporal de la vegetación de manera eficiente y económica (Calera et al., 2004).

Los dos principales métodos para la estimación de variables biofísicas mediante teledetección son los índices de vegetación y la inversión de modelos.

El uso de los índices de vegetación presenta algunos inconvenientes dado que, hasta la fecha, ninguno de ellos ha conseguido eliminar completamente las influencias no deseadas (Gao y Lesht, 1997; Baret y Guyot, 1991). Además, su uso no permite estimar más de una variable al mismo tiempo, la cual ha de ser específicamente calibrada mediante una ecuación empírica cuya forma matemática y coeficientes son particulares para cada estimación (Qi et al., 2000). En resumen, los índices de vegetación son relaciones

empíricas válidas para cada imagen (pues están asociados a sus condiciones de adquisición) y, por tanto, su uso operativo para estimar variables biofísicas no resulta evidente.

La inversión de modelos es un método teóricamente más objetivo, más generalizable, y más preciso que las técnicas empíricas (Gao y Lesht, 1997). Otra ventaja de la inversión física de modelos es el hecho de poder usar toda la información radiométrica aportada por el sensor. Sin embargo, el uso de modelos es para usuarios avanzados.

En el cultivo del maíz se ha logrado establecer robustas relaciones entre los índices de vegetación calculados a partir de imágenes aéreas y parámetros biofísicos, como son la producción de biomasa (Geipel et al. 2014), la evapotranspiración (Chávez et al., 2009; proyecto AG_UAS, 2014), el índice de área foliar (Haboudanea et al., 2004; Duan et al., 2014), la fracción de cobertura (Ballesteros et al., 2014), así como otros parámetros obtenidos a partir de las reflectividades de la cubierta como es la temperatura superficial (Canelón y Chávez, 2011), entre otros.

Jiménez-Berni (2009) usó imágenes obtenidas por un sensor a bordo de un UAV para calcular índices de vegetación como el NDVI, TCARI/OSAVI y PRI, y relacionarlos con parámetros biofísicos mediante el uso de metodologías cuantitativas basadas en modelos de transferencia radiativa, como PROSPECT o FLIGHT. Las estimaciones en maíz de LAI, de contenido de clorofila o las relaciones de temperatura y PRI con conductancia estomática, muestran resultados similares, o superiores, a los obtenidos con sensores a bordo de avionetas.

La estimación de variables biofísicas resulta muy interesante para algunas aplicaciones agronómicas, como la determinación del estrés hídrico para así poder realizar un riego diferenciado en la parcela. En maíz, se han encontrado trabajos en materia de fertilización nitrogenada y estimación de producciones fundamentalmente. Se citan en los dos siguientes apartados.

3.3. Fertilización nitrogenada

El fertilizante de nitrógeno es necesario para una producción rentable del maíz. Sin embargo, el exceso de aplicación de estos fertilizantes tiene efectos adversos en la calidad ambiental (Schepers et al., 1991) y, por supuesto, un gasto que el agricultor podría evitar.

Debido a la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, diferentes ubicaciones en una parcela pueden requerir diferentes cantidades de nitrógeno para lograr un alto rendimiento. En esta línea van los trabajos consultados. Así, Scharf et al. (2002) indica que la teledetección satelital podría resultar una herramienta adecuada para detectar estas ubicaciones en campos de maíz, pero tiene la limitación de la resolución temporal y espacial, limitaciones que actualmente con el uso de UAVs estarían salvadas. Watermeier et al. (2003) ya hacía una zonificación en función de datos en el infrarrojo próximo tomados en un vuelo, el mapa de suelo de la parcela y los puntos de muestreo en los que tomaba datos con un clorofilómetro. Resulta interesante la cuantificación de los beneficios económicos que supusieron las recomendaciones de fertilización del estudio, valoradas en 10 dólares por acre.

Miao et al (2009) vieron que la combinación de lecturas del clorofilómetro con imágenes de alta resolución espacial hiperespectral o multiespectral, puede superar las limitaciones del uso de ellos individualmente, ofreciendo así una solución práctica a la detección de deficiencia de N en grandes parcelas de maíz.

Queimada et al (2014) volaron a 300 m sobre parcelas piloto con un sensor hiperespectral y un térmico comparando la utilidad de esta información con la obtenida con clorofilómetros de campo. La toma de datos se hizo en dos fechas, una anterior a la segunda fertilización, y la otra antes de la floración. Indican que los índices de verdor como el NDVI, no son los mejores para la diferenciación entre deficiencias de nitrógeno y no deficiencias. Acaba indicando que se necesita más investigación para tener en cuenta otras fuentes de variabilidad que pueden interferir en la identificación de estado nutricional nitrogenado de la parcela.

3.4. Estimación de la producción

Conocer el rendimiento de un cultivo en general, y del maíz en particular, obedece principalmente a la necesidad de maximizar la relación inversión-ganancia. La disponibilidad de esa información con anticipación permite tomar decisiones sobre el manejo de la parcela. La utilización de imágenes aéreas permite el cálculo de índices de vegetación que se pueden relacionar con la producción o introducir en modelos de estimación más complicados como se ve en los estudios que se presentan a continuación.

Shanahan et al. (2001) realizó un ensayo en una parcela experimental de maíz con distintos

tratamientos de nitrógeno para obtener diferentes producciones al final de la campaña. Realizó un vuelo a 1000 m de altura con un avión sobre el que había colocado un sensor multiespectral que recogía información en las bandas del visible y el infrarrojo próximo. A partir de los valores de radiancia calculó 3 índices de vegetación (NDVI, GNDVI, TSAVI) y los relacionó con los datos de producción obtenidos a final de campaña. El GNDVI mostró las mejores correlaciones, sobre todo en la fase de llenado de grano.

Geipel et al. (2014) combinan mapas de índices de vegetación y detallados modelos de cultivos de superficie 3D que permiten métodos avanzados para la predicción de rendimiento de los cultivos. Este trabajo utiliza un UAV con un sensor RGB para la predicción de rendimiento de grano de maíz en tres etapas de crecimiento temprano a mediados de campaña. En este caso los índices de vegetación son usados para discriminar zona con cultivo y zona sin cultivo.

En el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) de Argentina están trabajando sobre parcelas experimentales desde hace varios años. Con información de años precedentes junto con imágenes provenientes de un sistema UAV consiguen caracterizar las variaciones de producción y la respuesta esperable en los cultivos usando el índice NDVI (Melchiori, 2014).

3.5. Otras experiencias

A continuación se enumeran una serie de otras experiencias que se han encontrado del uso de imágenes aéreas en el cultivo de maíz.

- Censo de plantas (Amago, 2014),
- Estimación de la densidad de plantación (Thorp et al., 2008),
- Estimación de los daños causados por la aplicación aérea de glifosato mediante índices de vegetación (Ortiz et al., 2011),
- Efecto del relieve en la polinización cruzada y, por tanto, en la producción (Vogler et al., 2009).

4. CONCLUSIONES

El uso de imágenes aéreas resulta adecuado para una gestión más sostenible del cultivo de maíz, tal y como constatan las experiencias encontradas y aquí presentadas. Algunas de estas experiencias se encuentran en estado de desarrollo más avanzado en el ámbito de la investigación, sin embargo, falta el canal conductor que haga llegar estos avances a los productores.

Una vez conocidas experiencias en las que se han usado imágenes aéreas en el campo de la agricultura, la creación de un paquete de servicios pasa ahora por definir las necesidades del sector, la plataforma a utilizar, que vendrá determinada por la superficie a cartografiar y la resolución espacial requerida, y el tipo de sensor. En esta toma de decisiones no se debe dejar de lado el coste de los equipos y de la tecnología, que influirá en el precio final de los servicios a ofrecer al agricultor.

AGRADECIMIENTOS

La presente comunicación es fruto del trabajo que se está llevando a cabo en el marco del convenio de colaboración entre la empresa SONEA Ingeniería y Medio Ambiente y el grupo RAMA (Grupo de Investigación en Riego, Agronomía y Medio Ambiente). Agradecer a todo el grupo y en especial a la Dra. M^a Auxiliadora Casterad, todo su apoyo, asesoramiento y tiempo dedicado a este proyecto.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Amago, I. (2014). "Utilizing the UAV for effective stand counting". <http://media.precisionhawk.com/topic/utilizing-the-uav-for-effective-plant-stand-management/>
- Atzberger, C. (2013). "Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs". *Remote Sensing*, 5, 949-981.
- Ballesteros, R., Ortega, J. F., Hernández, D., Moreno, M. A. (2014). "Applications of georeferenced high-resolution images obtained with unmanned aerial vehicles. Part II: application to maize and onion crops of a semi-arid region in Spain". *Precision Agriculture*, 15, 593-614.
- Baret, F. & Guyot, G. (1991). "Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment". *Remote Sensing of Environment*, 35, 161-173.

- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., Malkin, I.W. (2000). "Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications". *Agricultural Water Management*, 46, 137-155.
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P.J., Girona, J., Fereres, E. (2104). "Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle". *Precision Agriculture*, 1, 361-376.
- Calderón, R., Zarco-Tejada, P.J., Lucena, C., Navas-Cortés, J.A. (2013). "High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for pre-visual detection of *Verticillium* wilt using fluorescence, temperature and narrow-band indices". *Remote Sensing of Environment*, 139, 231-245.
- Calera, A., González-Piqueras, J. and Melia, J. (2004). "Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale". *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 97-109.
- Canelón, D.J. & Chávez, J.L. (2011). "Soil heat flux modeling using artificial neural networks and multi-spectral airborne remote sensing imagery". *Remote Sensing*, 3, 1627-1643.
- Cambra, C., Díaz, J.R., Lloret, J. (2015). "Deployment and performance study of an ad hoc network protocol for intelligent video sensing in precision agriculture". *Computer Science (including subseries Artificial Intelligence and Bioinformatics)* 8629, 165-175.
- Chávez, J.L., Gowda, P.H., Howell, T.A., Neale, C.M.U., Copeland, K.S. (2009). "Estimating hourly crop ET using a two-source energy balance model and multispectral airborne imagery". *Irrig Sci*, 28, 79-91.
- De Castro, A.I., Jurado-Expósito, M., Peña-Barragán, J.M. and López-Granados, F. (2012). "Airborne multi-spectral imagery for mapping cruciferous weeds in cereal and legume crops". *Precision Agriculture*, 13, 302-321.
- De Castro, A.I., López-Granados, F., Peña-Barragán, J.M., Jurado-Expósito, M. (2013). "Broad-scale cruciferous weed patches classification in winter wheat using QuickBird imagery for in-season site-specific control". *Precision Agriculture*, 14, 392-417.
- Dorado, J. & Fernández-Quintanilla, C. (2014). "Estrategias de manejo de malas hierbas en el cultivo del maíz". *Vida Rural* 1/04/2014, 26-31.
- Duan, S.-B., Li, Z.-L., Wu, H., Tang, B.-H., Ma, L., Zhao, E., Li, C., (2014). "Inversion of the PROSAIL model to estimate leaf area index of maize, potato, and sunflower fields from unmanned aerial vehicle hyperspectral data". *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*, 26, 12e20.
- Gao, W. & Lesht, B.M. (1997). "Model Inversion of Satellite-Measured Reflectances for Obtaining Surface Biophysical and Bidirectional Reflectance Characteristics of Grassland". *Remote Sens. Environ.*, 59, 461-471.
- Geipel, J., Link, J., Claupein, W. (2014). "Combined spectral and spatial modeling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system". *Remote Sensing*, 6 (11), 10335-10355.
- Gutiérrez, M. (2015). "Resultados de la red de ensayos de variedades de maíz y girasol en Aragón. Campaña 2014". *Técnicas del Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón*. Edita: Gobierno de Aragón. Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Depósito Legal: Z-3094/96. I.S.S.N.: 1137/1730.
- Haboudanea, D., Miller, J.R., Patteyc, E., Zarco-Tejada, P.J., Strachane I.B. (2004). "Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture". *Remote Sensing of Environment*, 90, 337-352.
- Huang, Y.B., Thompson, S.J., Hoffmann, W.C., Lan, Y.B, Fritz, B.K. (2013). "Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management". *Int.J Agric & Biol. Eng.*, 6(3), 1-10.
- Jiménez-Berni, J.A. (2009). "Determinación del estado hídrico de la vegetación mediante teledetección basada en vehículos aéreos no tripulados". Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba. 135 pp.
- Martín, M.P., Barreto, L., Riaño, D., Fernández-Quintanilla, C., Vaughan, P. (2011). "Assessing the potential of hyperspectral remote sensing for the discrimination of grassweeds in winter cereal crops". *International Journal of Remote Sensing*, 32(1), 49-67.

- Melchiori, R.J.M., Kemerer, A.C., Albarenque, S.M. (2014). "Uso de un UAV para el diagnóstico del estado de nutrición nitrogenada en maíz". 13º Curso Internacional de Agricultura de Precisión y Expo de Máquinas Precisas. 24 y 25 de septiembre de 2014. INTA E.E.A. Manfredi.
- Merino-Trujillo, A. (2011). "Como escribir documentos científicos (Parte 3). Artículo de revisión". Salud en Tabasco [en línea] 2011, 17 (Enero-Agosto): [Fecha de consulta: 7 de abril de 2015] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48721182006>> ISSN 1405-2091.
- Miao, Y., Mulla, D.J., Randall, G.W., Vetsch, J.A., Vintila, R. (2009). "Combining chlorophyll meter readings and high spatial resolution remote sensing images for in-season site-specific nitrogen management of corn". Precision Agric., 10, 45-62.
- Moran, M.S., Inoue, Y., Barnes, E.M. (1997). "Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management". Remote Sensing of Environment, 61, 319-346.
- Ortiz, B.V., Thomson, S.J., Huang, Y., Reddy, K.N., Ding, W. (2011). "Determination of differences in crop injury from aerial application of glyphosate using vegetation indices". Computers and Electronics in Agriculture 77 (2011), 204-213.
- Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., Cervantes, C. (2010). "Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges". Remote Sensing, 2, 2274-2304.
- Peña, J.M., Torres-Sánchez, J., de Castro, M., Kelly, M., López-Granados, F. (2013). "Weed mapping in early-season maize fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images". PLoS ONE, 8(10), e77151.
- Peña, J.M., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., López-Granados, F. (2014a). "Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV)". Revista de Teledetección, 42, 39-47.
- Peña, J.M., Torres-Sánchez, J., de Castro, A.I., Serrano-Pérez, A., López-Granados, F. (2014b). "Comparing visible and color-infrared UAV imagery for early-season weed mapping: the case of maize as a wide row crop". 2nd International Conference on Robotics and associated High-technologies and Equipment for Agriculture and Forestry. Madrid.
- Peña, J.M., Torres-Sánchez, J., de Castro A.I., López-Granados, F., Dorado, J. (2014c). "The TOAS Project: UAV Technology For Optimizing Herbicide Applications In Weed-Crop Systems". 12th International Conference on Precision Agriculture. 20-23 de julio 2014.
- Peña-Barragán, J.M., Kelly, M., de Castro, A.I., López-Granados, F. (2012). "Object-based approach for crop row characterization in UAV images for site-specific weed management". 4th International Conference on Geographic Object-Based Image Analysis (4th GEOBIA). Río de Janeiro, Brazil.
- Peña-Barragán, J.M., Ngugi, M.K., Plant, R.E., Six, J. (2011). Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. Remote Sensing and Environment, 115: 1301–1316.
- Proyecto AG_UAS. (2014). "Presentación del desarrollo del proyecto". 2 de junio 2014. http://www.lifeaguas.es/themed/lifeaguas/files/docs/098/049/encuentrofinalproyectolife_uaspresentacion_desarrollo_proyecto_aguas.pdf
- Qi, J., Kerr, Y.H., Moran, M.S., Weltz, M., Huete, A.R., Sorooshian, S., Bryant, R. (2000). "Leaf area index estimates using remotely sensed data and BRDF models in a semiarid region". Remote Sens. Environ., 73, 18-30.
- Queimada M., Gabriel, J.L., Zarco-Tejada, P. (2014). "Airborne hyperspectral images and ground-level optical sensors as assessment tools for maize nitrogen fertilization". Remote Sensing, 6, 2940-2962.
- Salami, E., Barrado, C., Pastor, E. (2014). "UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas". Remote Sensing, 6(11), 11051-11081.
- Scharf, P.C., Schmidt, J.P., Kitchen, N.R., Sudduth K.A., Hong, S.Y., Lory, J.A., Davis, J.C. (2002). "Remote sensing for nitrogen management". Journal of soil and water conservation, 57(6), 518-524.
- Schepers, J.S., Moravek, M.G., Alberts, E.E., Frank K.D. (1991). "Maize production impacts on groundwater quality". Journal of Environmental Quality, 20, 12-16.

- Shahbazi, M., Theáu, J., Ménard, P. (2014). “Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management”. *GIScience & Remote Sensing*, 51 (4), 339-365.
- Shanahan, J., Schepers, J.S., Francis, D.D., Varvel, G. E., Wilhelm, W.W., Tringe, J.M., Schlemmer, M.R., Major, D.J. (2001). “Use of Remote-Sensing Imagery to Estimate Corn Grain Yield”. *Agronomy Journal*, 93, 583-589.
- Thorp, K.R., Steward, B.L., Kaleita, A.L., Batchelor, W.D. (2008). “Using aerial hyperspectral remote sensing imagery to estimate corn plant stand density. Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan www.asabe.org. Paper number 063015, 2006 ASAE Annual Meeting.
- Torres-Sanchez, J., Lopez-Granados, F., Peña J.M. (2015). “An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: Application for vegetation detection in herbaceous crops”. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114 (2015), 43–52.
- Vogler A., Eisenbeiss, H., Aulinger-Leipner, I., Stampa, P. (2009). “Impact of topography on cross-pollination in maize (*Zea mays* L.)”. *European Journal of Agronomy* 31, 99-102.
- Watermeier, N., White, S., Rzewnicki, P. (2003). “In-season variable rate application of nitrogen in corn based on remotely sensed imagery”. Ohio Geospatial Technology Conference for Agriculture and Natural Resources. Holiday Inn Worthington, Columbus, Ohio. March 24-26, 2003.
- Yue, J.W., Lei, T.J., Li, C.C., Zhu, J.Q. (2012). “The application of unmanned aerial vehicle remote sensing on quickly monitoring crop pests”. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 18, 1043-1052.
- Zhang, C., Kovacs, J.M. (2012). “The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review”. *Precision Agriculture*, 13, 693-712.