

Potencialidad y nuevas orientaciones en el uso de la teledetección en agricultura y silvicultura

Alfonso García-Ferrer Porras

Universidad de Córdoba. ETSIAM

Fotos: Álvaro López

El importante desarrollo que ha experimentado la teledetección en el número de sensores, plataformas y software en las últimas dos décadas, ha proporcionado a científicos e investigadores nuevas fuentes de información en áreas tales como la oceanografía, la meteorología, la agricultura y las ciencias ambientales. Dentro de las nuevas oportunidades que ofrecen estas innovaciones, tecnologías como el uso de sensores hiper espectrales o térmicos, LiDAR, etc. han logrado captar la atención de la comunidad científica por la capacidad de proporcionar grandes cantidades de información actualizada, de forma periódica y precisa. Los sistemas agrícolas y forestales son particularmente propicios para la aplicación de estas tecnologías, con un alto potencial de desarrollo, especialmente en los procesos relacionados con la evaluación, seguimiento y aplicaciones de agricultura-silvicultura de precisión. En países como España, donde la actividad agrícola tiene una enorme importancia, existen grupos de investigación pioneros en el uso de productos obtenidos a partir de sensores remotos con fines de investigación. Aplicaciones relacionadas con la clasificación y cartografía de usos del suelo y vegetación, seguimiento de riego, evaluación de estructura y estrés en sistemas forestales,

etc., son nuevas áreas de desarrollo científico, con aplicaciones inmediatas al sector productivo. Este número de *Ambienta* se centra en la revisión de algunos de los trabajos más recientes a nivel nacional, relacionados con el uso de sensores remotos en agricultura y ciencias forestales, con el fin de proporcionar información del estado de las aplicaciones de estas herramientas en España.

LA TELEDETECCIÓN

La teledetección suministra información periódica y actualizada del territorio a partir de la medición de la intensidad de diferentes longitudes de onda de energía electromagnética que se reflejan desde la superficie terrestre. La intensidad con la que la energía electromagnética es reflejada, varía de acuerdo a la naturaleza física y propiedades ópticas de la superficie sobre la cual la energía incide.

En la década de los 50 se desarrollan los primeros satélites de observación de la Tierra con finalidad militar, que tuvieron un impacto inmediato en aplicaciones civiles, como el sensor de observación meteorológica TIROS (*Television and InfraRed Observation*



Las aplicaciones agrícolas y forestales, son algunas de las áreas de desarrollo de la teledetección mas activa en los últimos años, en aspectos tales como la estimación de la producción agrícola.

Los sistemas agrícolas y forestales son particularmente propicios para la aplicación de la teledetección, con un alto potencial de desarrollo, especialmente en los procesos relacionados con la evaluación, seguimiento y aplicaciones de agricultura-silvicultura de precisión

Satellite), y los posteriores sensores meteorológicos como el ESSA-1/9 (1966-1969), y NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Con la experiencia adquirida con estos sensores se pudieron desarrollar programas de observación de la Tierra y de evaluación de los recursos naturales, de gran impacto científico y tecnológico. El programa Landsat, que puso en órbita su primer satélite en 1972, ha mantenido su vigencia hasta la actualidad con el sensor Landsat-5 TM (*Thematic Mapper*) todavía operativo, y el Landsat 8-LDCM, lanzado recientemente. Otros países han puesto en marcha programas de teledetección, como Francia (consorcio franco-belga-sueco SPOT), Japón (JERS-1), o la India (IRS-1a, -1b and -1c, *National Remote Sensing Agency-Indian Research and Scientific Organisation*), ofreciendo una gran variedad de datos espaciales. De igual forma, se ha ampliado la oferta de sensores de muy alta resolución espacial, como *Geo-Eye* (1,64 m píxel) y *Quick-Bird* (2,4 m píxel).

Sin embargo, el desarrollo de la teledetección no ha parado ahí, y se han incorporando nuevos sensores que explotan datos en otras regiones del espectro electromagnético, como los sistemas activos radar. Algunos ejemplos son los sistemas radar de apertura sintética SAR (*Synthetic Aperture Radar*), como el instalado en el satélite ERS 1-2 (*European Remote Sensing*)

de la Agencia Espacial Europea (1991-1995) o RadarSat canadiense. Mas recientemente, se ha empezado a sustituir el tradicional análisis multiespectral, basado en los datos de a lo sumo cinco o seis bandas, por sensores hiperspectrales, que suministran información de 200 bandas del espectro simultáneamente, como el sensor hiperspectral Hyperion, montado sobre el satélite experimental EO-1.

El incremento de la resolución espacial y de la utilización de nuevos sensores (radar, hiperspectrales, LiDAR, etc.), así como de plataformas (aviones de pequeña envergadura, aviones no tripulados, etc.) amplían el campo de la teledetección en la observación de la tierra, y suponen un enorme campo de evolución de la teledetección.

El desarrollo de la teledetección solo ha sido posible gracias a una mejora de la capacidad de procesamiento y análisis de datos, en particular mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), que amplían las posibilidades de tratamiento, la simplificación de los procedimientos, y la mayor potencia y rapidez de las plataformas de proceso que están permitiendo abordar problemas más complejos. Por otro lado, el procesamiento de las imágenes es necesario para convertir la información de los sensores en un documento cartográfico (correcciones geométricas y atmosféricas principalmente), lo que obliga a un cuidadoso preprocesado de la información espectral para obtener como resultado un documento auténticamente cartográfico.

Las aplicaciones agrícolas y forestales, y en general de cubiertas vegetales, son algunas de las áreas de desarrollo de la teledetección más activa en los últimos años, en aspectos tales como la estimación de la producción agrícola, control de superficies de cultivo para el seguimiento de la Política Agraria Comunitaria (PAC) de la Unión Europea, el control de determinadas plagas o enfermedades de las plantas cultivadas y forestales, la evaluación de daños ocasionados por incendios forestales o su seguimiento en tiempo real.

En España, donde la actividad agrícola tiene una enorme importancia, existen grupos de investigación pioneros en el uso de productos obtenidos a partir de sensores remotos con fines de investigación. Aplicaciones relacionadas con la clasificación y cartografía de usos del suelo y vegetación, seguimiento de riego, evaluación de estructura y estrés en sistemas forestales, etc., son nuevas áreas de desarrollo científico, con aplicaciones inmediatas al sector productivo

La respuesta espectral de la vegetación depende de tres factores: la estructura geométrica de la planta, la química foliar y los parámetros agronómicos. La estructura geométrica de la planta influye en la cantidad de energía electromagnética que puede ser reflejada, absorbida o transmitida hacia el sensor. En el caso de la química foliar, la respuesta espectral también es influenciada por los pigmentos presentes en las hojas, como clorofila, caroteno, xantofila y antocianina. Parámetros agronómicos como variaciones en el contenido nutricional, o el contenido hídrico vinculado a prácticas de riego inciden directamente en longitudes de onda específicas. Mediante la medición de la respuesta (en términos de radiancia o de reflectancia) de la vegetación en cada intervalo de longitudes de onda, se identifican firmas espectrales que pueden caracterizar diferentes tipos de cubierta vegetal de acuerdo principalmente a sus propiedades ópticas y estado fisiológico.

El presente trabajo es una revisión de la información científica actualizada relacionada con

la aplicación de sensores remotos en agricultura. Se describe el desarrollo reciente de las aplicaciones en la cartografía y evaluación de recursos agrícolas y forestales: estimación de la producción, identificación de variedades a nivel mundial; y potencialidades y limitaciones dentro del contexto de la agricultura y la silvicultura en España.

CAMPOS DE APLICACIÓN

La teledetección, tanto en sus aspectos teóricos como aplicados, tiene un número creciente de aplicaciones en campos muy diversos, siendo uno de los más relevantes la observación de sistemas agrícolas y forestales. En este número monográfico se han seleccionado algunos ejemplos que organizados en dos grupos: aplicaciones de la teledetección a la agricultura y a la silvicultura, y que se han considerado de especial interés para profesionales relacionados con esos campos.

APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN A LA AGRICULTURA

Agricultura de precisión: hacia la integración de datos espaciales en la producción agraria

La integración de información georeferenciada de alta precisión con imágenes de satélite para obtener mapas de los cultivos, control de la producción, eficiencia de técnicas de cultivo (fertilización y riego), control de vegetación arvense, etc. en el marco de la agricultura de precisión ha sido ampliamente desarrollada en los últimos años. Un ejemplo de ellos son los trabajos realizados por diferentes grupos de investigación orientados al desarrollo de la Agricultura de Precisión. Éste término engloba una serie de tecnologías de aplicación en la producción agraria, que tienen como factor común el uso de las *Tecnologías de la Información y la Comunicación-TIC* en la racionalización de la toma de decisiones y su precisa ejecución.

La incorporación de Sistemas de Navegación Global por Satélite permite utilizar información georeferenciada orientada a ser usada por otros dispositivos electrónicos con diferentes propósitos, dando lugar a multitud de aplicaciones en agricultura: planificación de labores, mejora de la producción, uso eficiente de agroquímicos; además, de ofrecer mapas y geodatabases a escala de cultivo, información clave para las actuaciones de política agraria, modelización de la producción, o para aplicaciones medioambientales.

Evaluación de variables agro-meteorológicas mediante teledetección y su aplicación a la optimización del uso del agua

Por otro lado, los cultivos, en particular aquellos de alta producción, demandan una cantidad creciente de agua en un contexto de mayor escasez de este recurso, lo que exige herramientas y métodos para la planificación hidrológica y gestión del agua, recurso estratégico y escaso sin el cual no existiría el regadío. La teledetección permite conocer la relación entre la demanda hídrica de las plantas, el estado vegetativo de los cultivos y la programación y eficiencia de los riegos. A través de índices se puede conocer la actividad de las plantas y, a partir de ellos, generar mapas de demanda hídrica y estado vegetativo que permiten detectar cambios en el estado del cultivo, programación temporal de riego, deficiencias de riego, plagas y características del suelo. Así, las técnicas de teledetección permiten obtener información precisa de la superficie terrestre y de las condiciones atmosféricas para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos (ETc). La incorporación de modelos complejos que integran datos climáticos y datos procedentes de sensores espaciales permite determinar la ETc tanto en cultivos herbáceos como en cultivos leñosos, con resultados muy satisfactorios, siendo una alternativa muy relevante para establecer las necesidades de agua de los cultivos, lo que permite mejorar la gestión de los recursos hídricos.



Uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) para la evaluación de la producción agraria

Uno de los avances recientes más interesantes en el área de la teledetección es el uso de aviones no tripulados (drones o *Unmanned Aerial Vehicle* UAV), y su aplicación a la estimación de la productividad de cultivos agrícolas. El Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC está



Otra de las aplicaciones de la teledetección es el control de superficies de cultivo para el seguimiento de la Política Agraria Comunitaria (PAC) de la Unión Europea.

utilizando plataformas áreas de gran autonomía y bajo costo, para obtener espectrometría en campo, que analizada a través de índices de vegetación y variables agronómicas colectadas en campo, como índice de área foliar, pigmentos, o estado hídrico permite elaborar modelos de producción. El uso de índices de vegetación, y datos históricos de producción, permite hacer estimaciones de la productividad en un contexto de cambio en la condiciones de cultivos

(variabilidad climática, cambio de métodos de cultivo o variedades, etc.). Los resultados obtenidos hasta el momento, han mostrado valores muy precisos, y permiten evaluar datos acumulados de índice de vegetación en meses previos a la cosecha (predicción de producción), con el fin de permitir a los productores realizar ajustes en sus prácticas agronómicas necesarias en el manejo de cultivos. El uso de sensores sobre plataformas no tripuladas para la estimación de

producción agrícola tiene un alto potencial de aplicación en España. El desarrollar una herramienta capaz de estimar con un alto grado de precisión la producción agrícola, permitiría un mejor manejo de información tanto en la estimación de la producción acumulada, como la capacidad de predicción de la producción.

APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN A LAS CIENCIAS FORESTALES

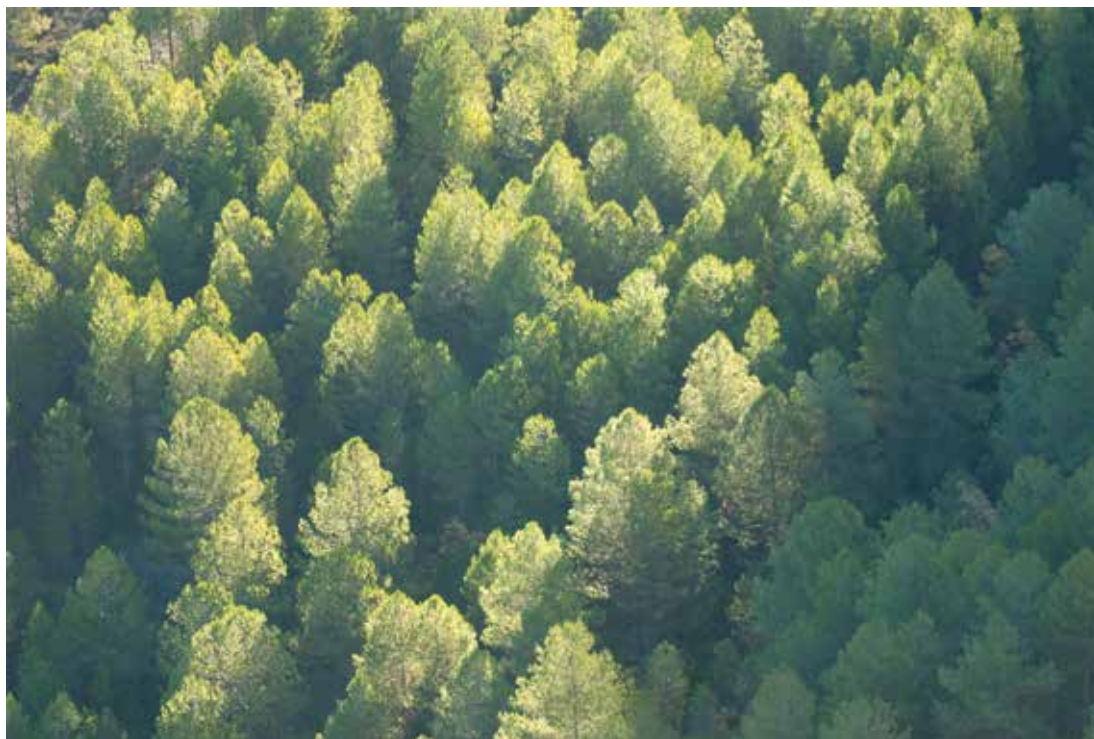
Sistema de adquisición a tiempo real del estado de los combustibles y evolución instantánea del fuego a partir de un sistema integrado de sensores multispectrales y térmicos

La evaluación de grandes incendios a partir de información procedente de sensores espaciales ha sido una de las aplicaciones más frecuentes en los últimos años, tanto para la identificación de los daños producidos por el fuego, cómo para la evaluación de los procesos de restau-

ración. El grupo empresarial INAER coordina desde el año 2010 el proyecto de I+D de mayor envergadura de Europa en materia de lucha contra incendios forestales, PROMETEO. El proyecto PROMETEO, cubre una de las demandas más importantes del sector de la lucha y el control de incendios forestales, con la participación de 15 empresas españolas líderes en su sector. Una de los principales objetivos del proyecto PROMETEO es la incorporación y optimización de herramientas de observación terrestre sobre distintos tipos de plataformas, y su integración en sistemas expertos para la toma de decisiones en emergencias. Un primer desarrollo tecnológico fue la herramienta de observación y tratamiento de la información para la toma de decisiones EINFOREX-DMT (*Decision Making Tool*), que utiliza imágenes gráficas georeferenciadas (EO/IR) en tiempo real acompañadas de pronósticos de simulación, junto con un software específico para la toma de decisiones que se apoya en la información aportada un nuevo sistema multispectral que caracteriza con mayor precisión el riesgo

Aplicaciones relacionadas con el seguimiento de riego, son parte de las nuevas áreas de desarrollo científico, con aplicaciones inmediatas al sector productivo.





El cambio climático supondrá en los próximos años un factor muy importante de perturbación de los sistemas forestales a nivel mundial, siendo los países del Mediterráneo una de las zonas más sensibles. Estos procesos están relacionados con una disminución en el contenido de clorofila y de la fotosíntesis que pueden ser detectados mediante sensores remotos de alta resolución espacial.

potencial de propagación del fuego. Estas nuevas aplicaciones permiten procesar con un alto grado de rapidez información procedente de diferentes sensores (multiespectrales, LiDAR, etc.), y han demostrado un alto grado de precisión en la cuantificación de biomasa, humedad y comportamiento del fuego.

Clasificación digital de zonas forestales usando datos LiDAR, ortofotos y análisis orientado a objeto

Dentro de la selvicultura, una de las aplicaciones de la teledetección que despierta mayor interés es el uso de información tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging). La posibilidad de obtener información de estructura y variables dasométricas a partir de sensores aerotransportados, permite estimaciones directas de variables de producción en bosques. La Universidad de Santiago de Compostela, a través del Laboratorio del Territorio – Departamento de Ingeniería Agroforestal, lleva años trabajando en aplicaciones LiDAR a modelos de producción. Los trabajos realizados muestran que, incluso utilizando datos de baja resolución

como los suministrados por el Plan Nacional de Observación A (PNOA), es posible obtener valores que se pueden aplicar a la gestión de sistemas forestales, simplificando y abaratando notablemente las técnicas de inventario y la estimación de parámetros selvícolas, como por ejemplo la biomasa, y que pueden mejorar los resultados de estimación de la producción de masas ordenadas. La clasificación digital de zonas forestales, atendiendo a las distintas categorías de cubierta del suelo, combinando información espectral obtenida de una ortofotografía aérea digital con datos LiDAR, permite discriminar clases de usos del suelo, y elaborar mapas temáticos de aplicación inmediata a la gestión de sistemas forestales.

Detección temprana de procesos de decaimiento en bosques de coníferas a partir de información hiperespectral y térmica

El cambio climático supondrá en los próximos años un factor muy importante de perturbación de los sistemas forestales a nivel mundial, siendo los países del Mediterráneo una de las zonas



Estas nuevas aplicaciones permiten procesar con un alto grado de rapidez información procedente de diferentes sensores (multiespectrales, LiDAR, etc.), y han demostrado un alto grado de precisión en la cuantificación de biomasa, humedad, etc.

mas sensibles. La exposición a largo plazo de estrés hídrico combinado con altos niveles de radiación y altas temperaturas provoca daños sobre los bosques, y procesos de mortalidad. Estos procesos están relacionados con una disminución en el contenido de clorofila y de la fotosíntesis que pueden ser detectados mediante sensores remotos de alta resolución espacial. En los últimos años se han desarrollado numerosos trabajos orientados a la detección temprana de procesos de decaimiento basados en el análisis del estado fisiológico de los árboles y la cartografía del contenido de los principales pigmentos que regulan la eficiencia de la fotosíntesis. En Andalucía, en concreto en la S^a de los Filabres (Almería), se están estudiando estos procesos a doseles de vegetación heterogéneos como los bosques de coníferas, mediante la medición de parámetros biofísicos en campo, análisis ópticos y bioquímicos foliares de laboratorio, así como el análisis de imágenes hiperespectrales

adquiridas en plataformas tripuladas y de vehículos aéreos no tripulados (UAV).

Evaluación de variables biofísicas mediante teledetección en pinares mediterráneos

En la identificación de la respuesta de sistemas forestales a perturbaciones asociadas con procesos a largo plazo, cómo es el impacto del cambio climático, la resolución espectral juega un papel muy importante, en particular a través de su relación con variables estructurales y biofísicas. Algunos de estos parámetros, como el índice de superficie foliar o el contenido de pigmentos, pueden estimarse mediante el uso de bandas específicas o bien calculando índices de vegetación. Sin embargo, cuando estos procesos son muy complejos (alta heterogeneidad espacial y temporal), puede ser necesario recurrir a sensores hiperespectrales como el sensor AHS o el EO-1 Hyperion, para la identificación

de bandas sensibles a pequeñas diferencias en pigmentación y contenido de agua, entre otros. El Grupo de Evaluación y Restauración de Sistemas Agrícolas y Forestales de la Universidad de Córdoba está realizando desde hace algunos años estudios orientados a discriminar variables biofísicas en sistemas forestales complejos, utilizando sensores de media/alta resolución espectral como Landsat o IKONOS, en combinación con otros sensores hiperespectrales como EO-1 Hyperion o ChrisProba, o datos LIDAR, que permitan identificar bandas sensibles a pequeños cambios fisiológicos dentro de la planta, como contenido de pigmentos o de agua.

CONCLUSIONES

La mayoría de estudios coinciden en señalar la importancia del uso de la teledetección en numerosas aplicaciones relacionadas con la agricultura y los ecosistemas terrestres, a partir de la experiencia adquirida en los últimos años sobre la respuesta espectral de diferentes tipos de cubierta vegetal. Los avances obtenidos en los estudios relacionados con sistemas agrícolas y forestales, y su relación con los procesos fisiológicos serviría de base para desarrollar modelos precisos que puedan describir criterios para la identificación específica, así como para estimar variables biofísicas. La integración de información espectral con datos fisiológicos puede apoyar nuevos estudios orientados a identificar parámetros que ayuden a evaluar la producción y la respuesta a estreses tanto de sistemas agrícolas como forestales.

Es importante también considerar el desarrollo de las aplicaciones de sensores remotos en ecosistemas análogos, y como estos están sujetos a los avances tecnológicos en materia de generación de nuevos sensores y técnicas de procesamiento de información. Una nueva generación de sensores con mejores resoluciones espaciales, espectrales y temporales, adaptados a las necesidades de los agricultores del mundo, unido a una reducción del costo de adquisición y procesamiento de las imágenes, hará estos productos más accesibles a todo tipo de usuarios.

Los estudios incluidos en éste monográfico ponen de manifiesto las oportunidades de desarrollo, tanto en la investigación como en la aplicación de sensores remotos en agricultura y ciencias forestales. Aunque solamente se han mencionado e incluido en este número algunos ejemplos de las posibles aplicaciones que se visualizan como algunas de las de mayor potencial de desarrollo en nuestro país, es importante mencionar que existen numerosos estudios relacionados con la evaluación del estado fitosanitario, el estado nutricional y la respuesta a estreses llevados a cabo por numerosos grupos de investigación de Universidades y Centros de Investigación en nuestro país. El grado de adopción de las nuevas tecnologías depende de la capacidad de éstas para satisfacer las principales demandas de los sectores productivos en materia de agricultura y selvicultura de precisión. Las herramientas necesarias para su desarrollo como los Sistemas de Información Geográfica y el Sistema de Posicionamiento Global ya son parte integral de muchas actividades agrícolas y forestales, así como la cada vez mas sencilla accesibilidad a imágenes de satélite de sensores como Landsat, MODIS o EO-1 Hyperion, que son de acceso gratuito para los usuarios. Lo anteriormente mencionado, aunado al creciente interés científico y técnico por estos temas, hace de los sensores remotos una herramienta fundamental para el desarrollo de la agricultura y la selvicultura en España, y más cuando el desarrollo de estas aplicaciones con un alto nivel tecnológico sea ya una realidad en nuestro país. ❀

Los sensores remotos una herramienta fundamental para el desarrollo de la agricultura y la selvicultura en España, y más cuando el desarrollo de estas aplicaciones con un alto nivel tecnológico sea ya una realidad en nuestro país