



I CONGRESO NACIONAL COMEII 2015

Reunión anual de riego y drenaje

Jiutepec, Morelos, México, 23 y 24 de noviembre

AGRICULTURA DE PRECISIÓN MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES

Ronald E. Ontiveros Capurata¹, Waldo Ojeda Bustamante²

¹ Instituto de Estudios Ambientales, Universidad de la Sierra Juárez, Av. Universidad SN. Carretera Guelatao-Ixtlán. Ixtlán de Juárez, 68725, Oaxaca, México.

² Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 62550 Jiutepec, Morelos, México.

Resumen

El crecimiento poblacional ha derivado en una demanda exponencial de productos agrícolas, para cubrir esta demanda se requiere mejorar la gestión y lograr un uso eficiente de recursos sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas, en particular los agrícolas. Una de las tecnologías que facilitan estas tareas es la agricultura de precisión (AP), que se enfoca en la optimización de recursos e insumos basado en la compilación de geo información precisa y oportuna de variables de interés agrícola de alta variabilidad espacio-temporal, obtenida mediante sensores remotos de tres tipos: imágenes capturadas por satélites o aviones, imágenes obtenidas desde vehículos aéreos tripulados y no tripulados (VANT's) e información puntual con sensores montados en maquinaria o en campo. En el primer caso se adquiere información con buena relación costo/beneficio pero limitada resolución espectral y temporal, la información puntual presenta baja resolución espacial; el uso de aviones y VANT's mejoró la resolución temporal-espacial aunque con limitada resolución espectral. Estas limitantes se superaron al usar cámaras y sensores hiperspectrales miniaturizados, lo que ha incrementado las aplicaciones fines agrícolas. Actualmente, los sensores remotos permiten cuantificar la humedad del suelo, monitorear la presencia de sequías y el grado de estrés hídrico de cultivos, estimar la variabilidad temporal y espacial de la evapotranspiración, dar seguimiento fenológico, detectar deficiencias nutricionales, estimar grado de infestación de malezas e insectos, calcular carbono orgánico y salinidad del suelo y estimar rendimientos y producción agrícola. El uso de tecnologías geoespaciales en la AP ha cambiado el paradigma de la agricultura y hoy en día constituye una alternativa viable para afrontar los retos que demanda la producción de alimentos en un mundo con alta variabilidad climática.



Palabras Clave: Sensores remotos, Resolución espacio-temporal, imágenes hiperespectrales.

Introducción

El crecimiento poblacional ha derivado en un desarrollo exponencial de la demanda de productos agrícolas, por lo que la necesidad de contar con mayor cantidad de alimentos en menor tiempo se hace cada vez más apremiante. El sistema de producción agrícola tradicional suministra insumos y recursos sin considerar la variabilidad espacial y temporal; el agua, los plaguicidas y fertilizantes se suministran de manera uniforme en todo el cultivo lo que deriva en un uso excesivo de insumos y trae consecuencias económicas y ambientales negativas como erosión del suelo, contaminación, reducción de fertilidad y compactación del suelo (Liaghat y Balasundram, 2010).

Ante esta problemática surgió la necesidad de asegurar un incremento de la producción agrícola, reducir los costos de producción y a la vez minimizar los efectos ambientales (NAP, 1997). En este contexto emerge la agricultura de precisión (AP) como una estrategia de manejo de cultivos agrícolas que emplea información detallada del sitio y del cultivo para reducir la incertidumbre en la toma de decisiones al considerar la variabilidad de las condiciones del sitio, clima cultivo, suelo, etc. para la aplicación de insumos (Mulla, 2013). La AP se caracteriza por presentar información de alta precisión espacio-temporal, cuyos resultados después del análisis son aplicables a un sitio en particular y cuya implementación requiere de un sistema de control y evaluación. Para cumplir con estos requerimientos se requiere de nuevas tecnologías como los Sistemas de Información Geográficos (SIG), sensores remotos, Sistemas de posicionamiento basados en satélites (GNSS), modelación computarizada y procesamiento de información que deben combinarse para brindar resultados en tiempo y precisión requeridos (Liaghat y Balasundram, 2010).

La AP incluye tres componentes: 1) capturar datos a una escala y frecuencia adecuada, 2) interpretación y análisis de esos datos y 3) implementación del resultado del análisis en las actividades de campo (NAP, 1997; Liaghat y Balasundram, 2010). Los procesos de AP implican también la evaluación de los avances y el cumplimiento de metas. La AP ha permitido, que con el tiempo, los productores se apropien de la tecnología y generan sistemas de autoevaluación de la eficiencia de las actividades implementadas y la toma decisiones sea más oportuna (Seelan et al. 2003). La AP permite lograr un manejo de la granja o finca más rentable, con uso óptimo de recursos e incremento de la producción agrícola en un contexto amigable con el medio ambiente pero sostenible en el tiempo garantizando así una seguridad alimentaria (Phillips, 2014).

Sensores remotos en la agricultura de precisión

La aplicación de sensores remotos en la AP se basa principalmente en medir la energía electromagnética reflejada, absorbida o transmitida después de su interacción con el

sistema suelo-planta-atmósfera, como resultado se obtienen las firmas espectrales que revelan características propias del cultivo, suelo en ese lugar y momento determinado. La agricultura de precisión inició a mediados de los 80s con la aplicación de imágenes satelitales para determinar características del suelo (pe. materia orgánica) (Ben Dor, 2002) esta tecnología representaba ciertas ventajas sobre las utilizadas en ese entonces (no destructivos, aplicables a grandes extensiones y viables en lugares inaccesibles) (Liaghad y Balasundram, 2010), con el tiempo se reconoció que las imágenes derivadas de sensores remotos de satélites tenían limitaciones (Moran et al. 1997), debido a su rango espectral reducido, resolución espacial gruesa y baja frecuencia de adquisición ofrecían información incompleta e imprecisa, la Figura 1 muestra las diversas aplicaciones de los sensores remotos como relación de la resolución espacial y temporal.

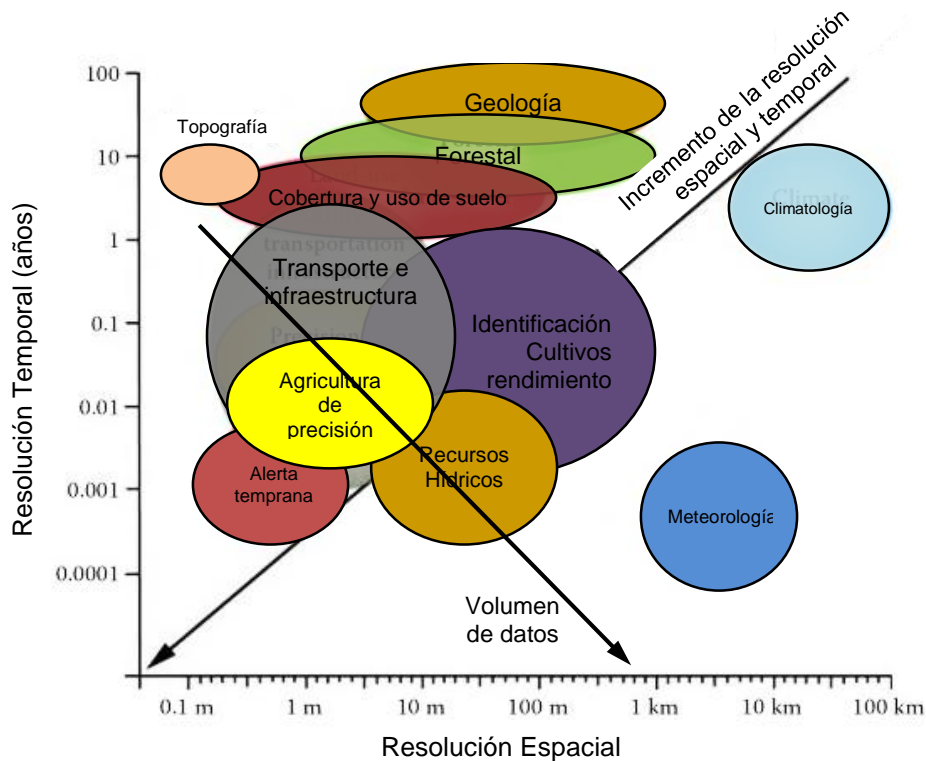


Figura 1. Aplicaciones de los sensores remotos en relación a la resolución espacial y temporal requerida (Davis et al. 1991).

Ahora la tecnología que usa sensores remotos, incluye no solo sensores montados en satélites, sino también en aviones, vehículos aéreos no tripulados o acoplados en los tractores en campo (Mulla, 2013), además el uso de otras regiones del espectro (pe. ultravioleta y microondas), otras energías (transmitida o absorbida) y la captura en mayor número de bandas espectrales que dieron paso a la teledetección hiperespectral y al desarrollo de más aplicaciones con mayor precisión (Sahoo et al., 2015).

Actualmente el análisis de la vegetación en la AP no se enfoca únicamente al índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI), se generaron índices para aplicaciones muy



específicas como, detectar enfermedades, predecir el avance de una plaga o la estimación de la fecha de cosecha (Panda et al. 2010), en la siguiente tabla se muestran algunos índices de vegetación usados en la agricultura de precisión.

Cuadro 1. Índices de vegetación más utilizados en la agricultura de precisión (Mulla, 2013).

Índice	Ecuación	Aplicación
NG	$V/(IRC+R+V)$	Detección de clorofila
NR	$R/(IRC+R+V)$	Detección de otros pigmentos (Carotenos)
RVI	IRC/R	Detección de clorofila (normalizado)
GRVI	IRC/V	Detección de otros pigmentos (Carotenos) (normalizado)
DVI	$IRC-R$	Cantidad de vegetación compensando los efectos del suelo
GDVI	$IRC-V$	Detección de la cantidad de Nitrógeno
NDVI	$(IRC-R)/(IRC+R)$	Cantidad de biomasa
GNDVI	$(IRC-G)/(IRC+G)$	Cantidad de biomasa compensando los efectos del suelo
SAVI	$1.5*((IRC-R)/(IRC+R+0.5))$	Cuantificación de las características de la vegetación considerando los efectos del suelo
GSAVI	$1.5*((IRC-V)/(IRC+V+0.5))$	
OSAVI	$(IRC-R)/(IRC+R+0.16)$	
GOSAVI	$(IRC-V)/(IRC+V+0.16)$	
MSAVI2	$0.5+(2*(IRC+1)-\sqrt{(2*IRC+1)^2 - 8*(IRC-R)})$	

V: Verde; R: Rojo; IRC: Infrarrojo cercano;

Otras características que han mejorado notablemente en los sistemas que manejan sensores remotos es la resolución espacial y temporal, los satélites o vehículos aéreos utilizados en AP pueden ahora obtener información de extensas áreas a un tamaño de pixel muy pequeño (< 1 m), así como también es posible contar con información de suelo y cultivo en tiempo real.

McBratney y Whelan (2015) encontraron en un estudio de caso en Australia que la aplicación de tecnología de la información geoespacial para la agricultura a través de la AP es rentable, puede crear puestos de trabajo, es amigable con el medio ambiente, y puede dar a los consumidores certidumbre en el proceso de producción, sin embargo no todos los casos cuantifican beneficios económicos de estas aplicaciones, Tenkorang y Lowenberg-DoBoer, (2008), refieren que la mayoría de los estudios documentados de aplicaciones se concentran en los aspectos técnicos pero descuidan el aspecto económico, no se tiene certeza sobre si el uso de sensores remotos realmente significa un incremento de la rentabilidad total del sistema agrícola.



A pesar de lo anterior los sensores remotos se utilizan en la AP para diversos fines entre los que se destacan, la estimación de la humedad del suelo, monitoreo de sequías y estrés hídrico de cultivos, estimación de la variabilidad temporal y espacial de la evapotranspiración, seguimiento fenológico, detección de deficiencias nutricionales, infestación de malezas e insectos, cálculo de carbono orgánico y salinidad del suelo y estimación de rendimientos y producción agrícola, a continuación se mencionan algunos ejemplos representativos.

Agricultura de precisión en base sensores remotos de satélites

El desarrollo de nuevos sistemas de adquisición de datos, tecnologías y sensores permitió incrementar la resolución espacial, ahora se cuenta con imágenes de muy alta y mediana resolución (0.8 – 10 m), y la adquisición de información a partir de sensores activos como los radares, permite obtener información en cualquier situación atmosférica incluso en ausencia de luz solar (Luccio, 2015), el Cuadro 2 muestra algunos de los sensores montados en satélites más utilizados en AP y sus características de resolución espacial y temporal (Mulla, 2013), las aplicaciones de estos sensores se ha diversificado gracias a la mejora de las características espaciales y temporales.

Cuadro 2. Principales sistemas satelitales usados en AP (Mulla, 2013; DigitalGlobe, 2015).

Tipo	Plataforma	R. Temp.	R. Espacial (m)
SATÉLITE	MODIS	2 días	250-1000
	ASTER	16 días	>30
	Landsat	16 días	30
	SPOT 1-5	2-3 días	5-30
	Rapid Eye	5.5 días	6.5
	SPOT 6	Diario	1-5
	CBERS	5 días	2.7
	IKONOS	3 días	<1
	Cartosat	5 días	0.25
	WorldView3	Diario	0.3

Con estos avances el uso de información derivada de sensores remotos montados en satélites aún está vigente y se ha diversificado, por ejemplo, Pan et al. (2009) combinaron imágenes del satélite Quickbird con datos de un modelo de eficiencia de producción (PEM) para estimar el rendimiento de cultivos en China, los resultados indicaron que las imágenes mejoran sustancialmente la precisión de estimación del rendimiento en comparación a los obtenidos con datos de campo.

En el ámbito de riego Folhes et al. (2009) utilizaron imágenes del satélite Landsat combinadas con un modelo de evapotranspiración para medir la cantidad de agua de riego utilizada en una zona de riego con cultivo de banano, los resultados demostraron



que la combinación de modelos con datos de reflectancia espectral brinda mejores resultados que si solo se utilizara el modelo de predicción. Droogers et al. (2010) encontraron que la estimación de la cantidad necesaria para riego a partir de la evapotranspiración es suficientemente precisa con el uso de imágenes satelitales cuando esta información está disponible con una frecuencia de 15 días o menos y cuando la distorsión de las imágenes es menor al 10%.

Las propiedades del suelo están entre las características más determinantes para la AP, es por eso que han recibido mucho interés en su estimación a partir de imágenes, Ge et al. (2011), mostraron que es posible estimar algunas propiedades de los suelos como textura, contenido de humedad, contenido de carbono y conductividad eléctrica, con precisión aceptable a partir de las características espectrales en la región del infrarrojo cercano y el visible, sin embargo estas aplicaciones han sido duramente criticadas por ser muy cualitativas o muy caras por el gran número de muestras de campo que requieren (Omran, 2012).

En el caso de imágenes adquiridas por sensores montados en satélites, las aplicaciones son amplias en agricultura de precisión. Claverie et al. (2012), investigaron la perspectiva ofrecida por el acoplamiento de un algoritmo sencillo para estimar rendimiento (SAFY) con los datos del satélite FORMOSAT-2, en grandes áreas, en este caso maíz bajo riego y girasol. El modelo hizo posible la simulación de series de tiempo de índice de área foliar (IAF) y biomasa aérea seca y fue capaz de reproducir un gran conjunto de capas temporales de IAF, relacionados con comportamientos fenológicos y tipos de cultivo.

Las nuevas tendencias y el impulso para el desarrollo de nuevos sensores y satélites indican que son una opción viable para la adquisición de datos aplicados en AP, por citar un ejemplo en los últimos años la NASA en cooperación con el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) lanzaron el Landsat 8 en 2013 equipado con dos sensores avanzados con capacidad de obtener datos en mayor cantidad de bandas espectrales y de uso libre lo que ofrece la oportunidad de seguir utilizándolos para monitorear grandes superficies (USGS, 2015). Estas imágenes son utilizadas en la actualidad de manera conjunta con información estadística y datos socioeconómicos para brindar información sobre la cantidad de alimentos y seguridad alimentaria a varias escalas a nivel mundial por el grupo GEOGLAM (Group on Earth Observations Global Agricultural Monitoring) que en el futuro ofrecerá datos sobre los cultivos y asegurará el suministro de información confiable sobre la producción agrícola a los mercados internacionales (Brown, 2015).

En 2013 la empresa Skybox Imaging puso en órbita el primer micro satélite de observación terrestre con el que se espera obtener imágenes y video a resoluciones submétricas en cuatro bandas espectrales (VIRC) y que permitirán el monitoreo de plagas y enfermedades y la planificación adecuada del riego (Skybox Imaging, 2015). Para el 2016 la empresa rusa Dauria Aerospace desarrollará y pondrá en órbita una constelación de satélites miniatura



equipados con sensores multiespectrales para el monitoreo de cultivos en todo el planeta con una frecuencia diaria (Dauria Space, 2015).

Agricultura de precisión en base a sensores remotos proximales o de media distancia

El desarrollo de sensores proximales o de media distancia surge como necesidad de obtener información más precisa y oportuna que la obtenida con satélites, los sistemas proximales consisten de sensores montados en la maquinaria o instalados directamente en campo de tal manera que se obtienen datos a una corta distancia o en contacto con el cultivo o suelo (Adamchuk, 2010), por otro lado en los sistemas a media distancia los sensores van montados en vehículos aéreos tripulados o no tripulados y obtienen la información del cultivo a diferentes distancias o alturas. Con este tipo de sistemas las aplicaciones se han incrementado, principalmente en la detección y seguimiento de la infestación de plagas, Riedell et al. (2005) encontraron a partir de la información derivada de cámaras multiespectrales una relación directa entre el daño ocasionado por las plagas en avena y sus características espectrales entre 350-1100 nm y demostraron que es posible cuantificar el daño y predecir el avance de la infestación a partir de un monitoreo de las características espectrales del cultivo principalmente a 600 nm.

Estudios realizados en los últimos años muestran el potencial del uso de sensores proximales para realizar estimaciones de contenidos de N y clorofila en cultivos. Schlemmer et al. (2013) realizaron un estudio en el dosel de maíz de regadío bajo diversos tratamientos de fertilización con N. La reflectancia del dosel y las hojas se midieron con un espectroradiómetro Ocean Optics USB2000 en el intervalo de 350 nm a 1024 nm, con incrementos de 0.37 nm y colocando el sensor a 1 m del cultivo. Los resultados mostraron que la clorofila y N a nivel del dosel se pueden estimar con el índice de Clorofila verde y rojo límite en bandas espectrales del infrarrojo cercano (780-800 nm), verde (540-560 nm), o límite rojo (730-750 nm). Estas bandas coinciden con las del sensor Spectral Instrument (MSI) a bordo del satélite Sentinel-2, por lo que podría ser útil en aplicaciones de agricultura en áreas extensas.

Las aplicaciones de los sensores proximales, son amplias y en el campo de la agricultura de precisión pueden apoyar la detección temprana de estrés hídrico causado por exceso de riego. Marino y Alvino (2014) realizaron un estudio en cultivos de tomate bajo riego, usando un espectroradiómetro FieldSpec® Hand-Held Pro para medir la luz reflejada desde el dosel, en el rango de 350 a 1100 nm, con distancia de muestreo espectral de <1.5nm; evaluaron tres índices de vegetación: Índice de Agua (WI), WI/NDVI y TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index), este último resultó el más efectivo para detectar condiciones de exceso de agua en el suelo. La Figura 2 muestra algunas aplicaciones de sensores remotos montados en satélites y que se utilizan en AP.

Otra posibilidad es la combinación de imágenes aéreas y análisis espectral. Geipel et al. (2014), realizaron un trabajo en maíz, se utilizó un vehículo aéreo no tripulado para capturar imágenes RGB que combinadas con modelos de cultivo superficie (CSM) 3D permiten predecir la producción. Las imágenes RGB tienen limitada información espectral si se compara con imágenes multi, hiperespectral y termales pero al combinarla con CSM resultó adecuado para predecir la producción aun cuando el cultivo esté a mitad de la temporada

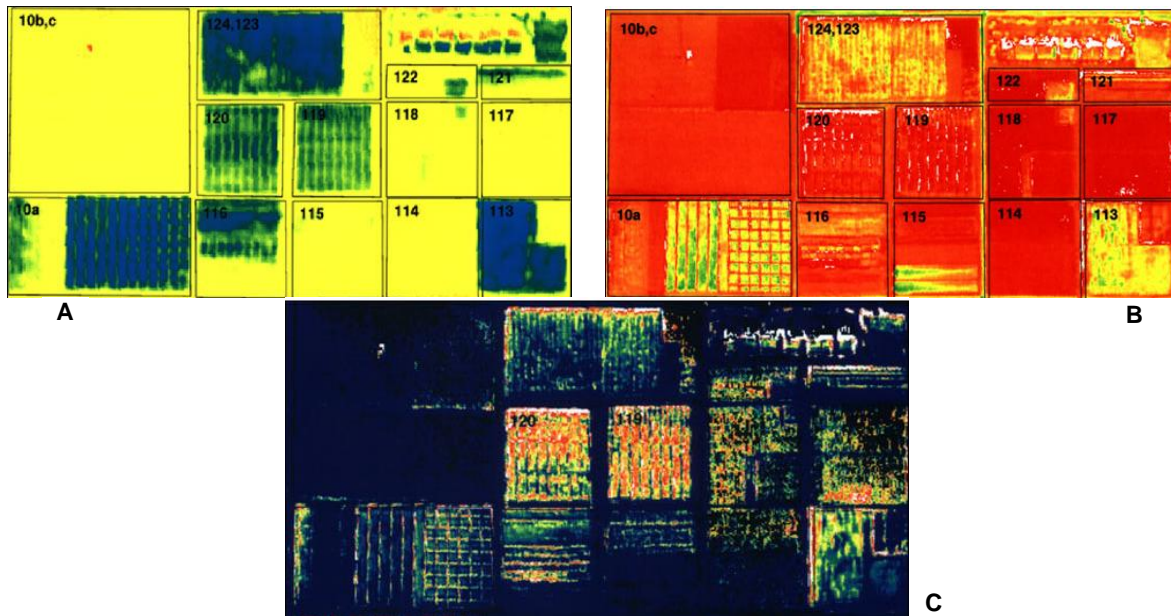


Figura 2. Imágenes en falso color de aplicaciones de sensores remotos en agricultura. Todas las imágenes fueron tomadas con el sensor Daedalus montado en un avión de la NASA A) Densidad de vegetación con NDVI, B) Déficit hídrico derivado de reflectancia y temperatura, C) Estrés de cultivos debido a falta de riego.

Nuevas tendencias de la AP, los sensores hiperespectrales

La teledetección hiperespectral colecta datos en un amplio rango del espectro a pequeñas distancias espectrales (<10 nm) y a diferencia de la teledetección multispectral o pancromática obtiene los valores de reflectancia, absorbancia o transmitancia en muchas regiones del espectro lo que otorga una gran ventaja para poder reconocer características con mayor precisión, la desventaja de la teledetección hiperespectral es que se tiene gran cantidad de datos y en muchos casos las bandas espectrales suelen ser redundantes, la Figura 3 muestra un ejemplo de una firma espectral y su correspondiente imagen tomada con sensores hiperespectrales para un cultivo de patata a diferentes grados de fertilización con nitrógeno y para el suelo con diferentes grados de humedad (Mulla, 2013).

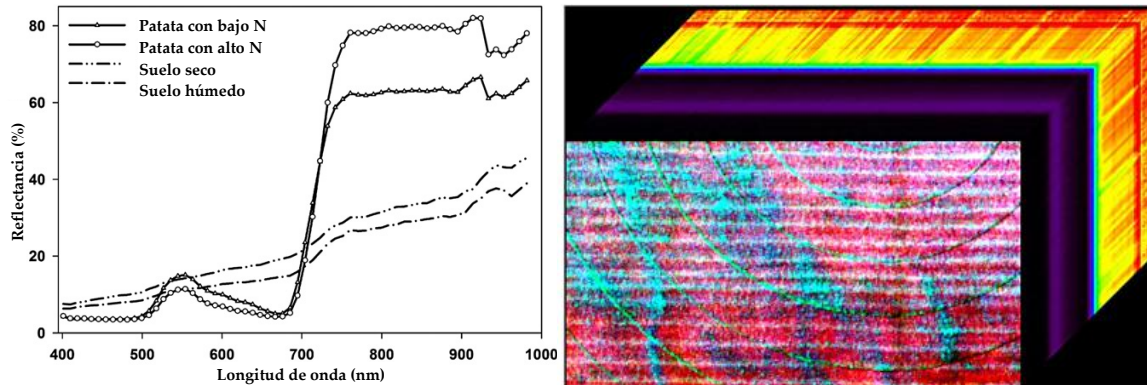


Figura 3. Ejemplo de una firma espectral y su correspondiente imagen capturada con un sensor hiperespectral para el cultivo de patata con dos niveles de fertilización de N y diferentes estatus de humedad en el suelo (Mulla, 2013).

En otro estudio Carroll et al. (2008), realizaron un estudio donde mostraron que es posible usar índices espectrales de vegetación (SVI) para detectar infestación de *Ostrinia nubilalis* en maíz. Se usó una cámara hiperespectral de adquisición de imágenes en tiempo real (RDACS-H49) montada en un avión.

En condiciones de estrés hídrico, la tasa de crecimiento puede ser menor, por lo cual los índices de vegetación son relevantes para estimar producción primaria especialmente en climas semiáridos donde la vegetación está bajo estrés hídrico la mayor parte del tiempo, y se debe ajustar el coeficiente acorde al estrés presente. Es así, que Calera et al. (2004) analizaron cultivos de cebada y maíz bajo diversos regímenes de riego, tomaron datos en campo (altura de planta, fracción de cobertura vegetal verde, índice área foliar y estado fenológico) y medidas radiométricas con un espectroradiómetro GER-3700, en rango espectral de 300 a 2500 nm y resolución máxima espectral de 1.4 nm. Se midió reflectancia con el sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM)+ de la plataforma LANDSAT y luego se calculó NDVI. El estudio mostró que la biomasa seca está relacionada de forma lineal con TINDVI (Time integrated value of the NDVI). Además se encontró que el estado hídrico de la vegetación es un parámetro capaz de modificar la relación entre tasa de crecimiento del cultivo y NDVI.

Los sistemas terrestres no tripulados (UGVS) son un alternativa utilizada a menudo en el monitoreo de cultivos, pueden estar equipados con diversos sensores que les permiten realizar mediciones simultáneas. Wang et al. (2014) desarrollaron un UGVS (Figura 4) equipado con i) sensor GreenSeeker® que verifica en tiempo real la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo usando NDVI, ii) espectroradiómetro FieldSpec® Handheld que detecta luz reflejada desde el dosel en un rango de 325 nm a 1075 nm, con intervalo de muestreo de 1.4 nm, iii) sensor de temperatura por infrarrojo de Apogee Instruments, iv) espectrómetro CGMD302 para detectar reflectancia e indicadores espectrales en tiempo real. El equipo se aplicó en cultivos de arroz, y los resultados mostraron que los mejores índices para estimar IAF fueron NDVI (860 a 750 nm) y RVI (853 nm a 751 nm).

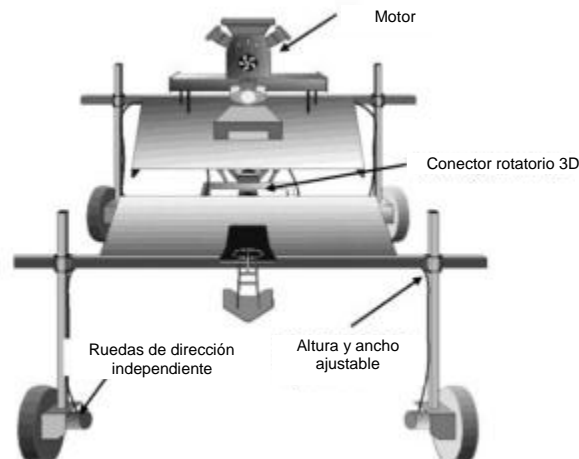


Figura 4. Sistema terrestre no tripulado (UGVS) equipado con 4 sensores hiperspectrales para la estimación de diferentes características del cultivo de arroz (Wang et al. 2014).

Andrade-Sánchez et al. (2013) desarrollaron un sistema terrestre no tripulado para “fenotipificación” en campo, equipado con cuatro conjuntos de sensores para medir: i) altura de dosel calculada mediante la combinación de datos obtenidos por un sensor sonar de proximidad Pulsar db3 transducer (125 – 3000 mm) y datos de elevación de GPS), ii) reflectancia con el sensor multispectral Crop Circle ACS-470 a 670 nm, 720 nm y 820 nm; y iii) temperatura del dosel mediante dos sensores radiómetros infrarrojos Apogee S1-121. El sistema se probó en cultivos de algodón con diferentes tratamientos de riego y se contrastó con datos de campo y VNIR y TIR tomados desde helicóptero. Los resultados estuvieron acorde a los estudios comparativos confirmando la habilidad del sistema para medir múltiples rasgos de forma rápida y precisa. El próximo paso en sistemas terrestres es la incorporación de sensores para capturar imágenes de alta resolución y tecnología espectral para medir mayor diversidad de rasgos fenotípicos dinámicos.

Los Índices de vegetación de bandas basadas en rojo y el infrarrojo cercano, como el NDVI sufren saturación a valores medios y altos de IAF. Para sortear esta dificultad Delegido et al. (2013) realizaron un trabajo donde estimaron el IAF verde de 9 cultivos (ajo, alfalfa, cebolla, girasol, maíz, patata, camote, viñedos y trigo), para lo cual usaron datos de IAF de la Agencia Espacial Europea e imágenes adquiridas con el sensor hiperspectral CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) a bordo en el satélite PROBA. Este amplio conjunto de datos permitió determinar que la mejor correlación lineal se obtuvo al combinar bandas de frecuencia 674 nm y 712 nm, que corresponden a la máxima absorción de clorofila y la región del rojo límite respectivamente; además son sensibles al estado fisiológico de la planta. El índice espectral rojo límite es una alternativa válida para determinar IAF y conseguir información valiosa en agricultura de precisión, al trabajar por ejemplo con imágenes de alta resolución espacial.



Rossini et al. (2013) presentaron una metodología para mapear estrés hídrico usando teledetección con imágenes aéreas hiperespectrales de un campo de maíz con tres diferentes tratamientos de irrigación, se midió contenido relativo de agua en hoja (RWC), clorofila fluorescencia activa (DF/F0 m), temperatura de hoja (TI) e índice de área foliar (IAF). El análisis mostró que las parcelas de maíz con déficit de riego experimentaron un estrés hídrico moderado que afecta la fisiología vegetal, demostrando el potencial de los sensores hiperespectrales para apoyar en la gestión de agua sobre cultivos.

Conclusiones

La agricultura de precisión ha adquirido gran interés durante los últimos años, como alternativa para la optimización de recursos y la maximización de rendimientos en todo el mundo, cada vez más aplicaciones usando tecnologías geoespaciales (sensores remotos, GPS y SIG) son encontradas y adoptadas por los agricultores.

La precisión y efectividad de las aplicaciones que usan sensores remotos dependen principalmente de la resolución temporal (frecuencia de adquisición) y resolución espacial (área de muestreo) con que se obtiene la información, aunque estas características fueron mejoradas desde sus inicios y ahora existen sensores de diferente tipo, montados en satélites, vehículos aéreos (tripulados y no tripulados) y proximales cada vez más avanzados, lo ideal es usar una combinación espacio-temporal adecuada para cada aplicación.

Para solventar las limitantes de la aplicación de tecnologías geoespaciales en AP se ha recurrido al uso de la información generada por una combinación de varios sistemas de adquisición y con diferentes características por ejemplo, datos generados por cámaras y sensores proximales o de media distancia con buena resolución temporal se combinan con imágenes satelitales de mediana resolución espacial para obtener resultados más precisos.

El uso de tecnologías geoespaciales en la AP ha cambiado el paradigma de la agricultura y hoy en día constituye una alternativa viable para afrontar los retos que demanda la producción de alimentos en un mundo con alta variabilidad climática.

Referencias bibliográficas

- Adamchuk, V. (2010). Precision agriculture: Does it make sense?. *Better Crops with Plant Food*, 94(3), 4-6.
- Andrade-Sanchez, P., Gore, M. A., Heun, J. T., Thorp, K. R., Carmo-Silva, A., Elizabete, F., et al. (2013). Development and evaluation of a field-based high-throughput phenotyping platform. *Functional Plant Biology*, 41, 68-79.



- Ben-Dor, E. (2002). Quantitative remote sensing of soil properties. *Advances in Agronomy*, 75, 173-243.
- Brown, M. E. (2015). Satellite remote sensing in agriculture and food security assessment. *Procedia Environmental Sciences*, 29, 307.
- Calera, A., González-Piqueras, J., & Melia, J. (2004). Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 97-109.
- Carroll, M. W., Glaser, J. A., Hellmich, R. L., Hunt, T. E., Sappington, T. W., Calvin, D., et al. (2008). Use of spectral vegetation indices derived from airborne hyperspectral imagery for detection of european corn borer infestation in iowa corn plots. *Journal of Economic Entomology*, 101(5), 1614-1623.
- Claverie, M., Demarez, V., Duchemin, B., Hagolle, O., Ducrot, D., Marais-Sicre, C., et al. (2012). Maize and sunflower biomass estimation in southwest france using high spatial and temporal resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 124, 844-857.
- Dauria. (2015). *Dauria aerospace*. Retrieved Octubre 10, 2015, from <http://dauria.ru/on-orbit/>
- Davis, F. W., Quattrochi, D. A., Ridd, M. K., Lam, N., Walsh, S. J., Michaelsen, J. C., et al. (1991). Environmental analysis using integrated GIS and remotely sensed data: Some research needs and priorities. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(6), 689-697.
- Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C. M., Rivera, J. P., Alonso, L., & Moreno, J. (2013). A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, 46, 42-52.
- Digital Globe. (2015). *Remote sensing technology trends and agriculture*. Retrieved Octubre 10, 2015, from <http://global.digitalglobe.com/sites/default/files/DG-RemoteSensing-WP.pdf>
- Droogers, P., Immerzeel, W. W., & Lorite, I. J. (2010). Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1351-1359.
- Folhes, M. T., Rennó, C. D., & Soares, J. V. (2009). Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid northeast of brazil. *Agricultural Water Management*, 96(10), 1398-1408.



- Ge, Y., Thomasson, J. A., & Sui, R. (2011). Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Frontiers of Earth Science*, 5(3), 229-238.
- 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.
- Liaghat, S., & Balasundram, S. K. (2010). A review: The role of remote sensing in precision agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 5(1), 50-55.
- Luccio, M. (2015). *Satellite imagery for precision agriculture*. Retrieved Octubre 15, 2015, from <http://www.xyht.com/enviroag/satellite-imagery-precision-agriculture/>
- Marino, S., & Alvino, A. (2014). Proximal sensing and vegetation indices for site-specific evaluation on an irrigated crop tomato. *European Journal of Remote Sensing*, 74, 271-283.
- McBratney, A. B., & Whelan, B. (2015). *Precision agriculture*. Retrieved Octubre 20, 2015, from <http://www.regional.org.au/au/gia/09/274mcbratney.htm#TopOfPage>
- 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, 319-349.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371.
- NAP. (1997). *Precision agriculture in the 21st century: Geospatial and information technologies in crop management*. Washington DC: National Academy Press.
- Omran, E. E. (2012). On-the-go digital soil mapping for precision agriculture. *International Journal of Remote Sensing Applications*, 2(3), 20-38.
- Pan, G., Sun, G., & Li, F. (2009). Using QuickBird imagery and a production efficiency model to improve crop yield estimation in the semi-arid hilly loess plateau, china. *Environmental Modelling & Software*, 24(4), 510-516.
- Panda, S. S., Hoogenboom, G., & Paz, J. O. (2010). Remote sensing and geospatial technological applications for site-specific management of fruit and nut crops: A review. *Remote Sensing*, 2(8), 1973-1997.
- Phillips, S. (2014). Precision agriculture: Supporting global food security. *Better Crops with Plant Food*, 98(3), 4-6.



- Riedell, W. E., Osborne, S. L., & Hesler, L. S. (2005). Insect pest and disease detection using remote sensing techniques. *Meeting Proceedings. 7th International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis.
- Rossini, M., Fava, F., Cogliati, S., Meroni, M., Marchesi, A., Panigada, C., et al. (2013). Assessing canopy PRI from airborne imagery to map water stress in maize. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 86, 168-177.
- Sahoo, R. N., Ray, S. S., & Manjunath, K. R. (2015). Hyperspectral remote sensing of agriculture. *Current Science*, 108(5), 848-859.
- Schlemmer, M., Gitelson, A., Schepers, J., Ferguson, R., Peng, Y., Shanahan, J., et al. (2013). Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 25, 47-54.
- Seelan, S. K., Laguetta, S., Casady, G. M., & Seielstad, G. A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, 88(1-2), 157-169.
- Skybox Imaging. (2015). *Skybox imaging*. Retrieved Noviembre 03, 2015, from <http://www.skyboximaging.com/products/pixels>
- Tenkorang, F., & Lowenberg-DeBoer, J. (2008). On-farm profitability of remote sensing in agriculture. *Journal of Terrestrial Observation*, 1(1), 6.
- USGS, 2015. Landsat 8. Factsheet. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/fs/2013/3060/pdf/fs2013-3060.pdf>. 10/11/2015.
- Wang, P., Lan, Y. B., Luo, X. W., Zhou, Z. Y., Wang, Z., & Wang, Y. (2014). Integrated sensor system for monitoring rice growth conditions based on unmanned ground vehicle system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(2), 75-81.