

**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE
SUBCOORDINACIÓN DE INGENIERÍA DE RIEGO**



DR. WALDO OJEDA BUSTAMANTE (JEFE DE PROYECTO)

Jiutepec, Morelos, Noviembre de 2015

DIRECTORIO

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Director General

Dr. Felipe I. Arreguín Cortés

Coordinador de Riego y Drenaje

Dr. Nahún Hamed García Villanueva

Subcoordinador de Ingeniería de Riego

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Jefe de Proyecto

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Participantes del IMTA

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Dr. Jorge Flores Velázquez

Dr. Alberto González Sánchez

Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

M.I. Ernesto Olvera Aranzolo

Lic. Braulio David Robles Rubio

M.Sc. Helene Emmi Karin Unland Weiss

Apoyo Externo

Ing. Mariana de Jesús Marcial Pablo

Ing. Sergio Iván Jiménez Jiménez

Ing. Anastasio Toledo Estrada

CONTENIDO GENERAL

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN..... | 8 |
| 1 ANTECEDENTES..... | 9 |
| 2 ACTIVIDADES REALIZADAS..... | 11 |
| 2.1 Capacitación en el uso y manejo de VANTs..... | 11 |
| 2.2 Desarrollo y puesta en marcha de aplicaciones en Riego y Drenaje | 12 |
| 2.3 Documentación de aplicaciones en Riego y Drenaje | 13 |
| 3 RESULTADOS OBTENIDOS | 14 |
| 4 CAPACITACIÓN EN EL USO Y MANEJO DE VANTs..... | 15 |
| 4.1 Curso de RPA (Remotely Piloted Aircraft)..... | 15 |
| 4.2 Curso de planeación y producción de aerofotomosaicos georeferenciados con vehículos aéreos no tripulados..... | 16 |
| 4.3 Curso teórico-práctico de pilotaje remoto e instrumentación para vehículos aéreos no tripulados | 17 |
| 5 DESARROLLO Y PUESTA EN MARCHA DE APLICACIONES EN RIEGO Y DRENAJE..... | 19 |
| 5.1 Obtención de planos topográficos..... | 19 |
| 5.2 Supervisión de infraestructura hidroagrícola | 20 |
| 5.3 Obtención de curvas de avance-recesión en riego por gravedad..... | 20 |
| 6 DIFUSIÓN DE APLICACIONES Y DOCUMENTOS DEL PROYECTO .. | 21 |
| 6.1 Videos..... | 21 |
| 6.2 Artículo enviado a revista Tecnología y Ciencias del Agua | 21 |
| 6.2.1 Aplicaciones de los Vehículos Aéreos No Tripulados en la ingeniería hidroagrícola | 21 |
| 6.3 Ponencias presentadas en el I Congreso Nacional de Riego y Drenaje | 22 |
| 6.3.1 Ponencia I..... | 22 |
| 6.3.2 Ponencia II | 23 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.3.3 | Ponencia III..... | 24 |
| 7 | LITERATURA CONSULTADA..... | 26 |
| 8 | ANEXOS..... | 28 |
| 8.1 | Anexo 1. Curso de RPA (Remotely Piloted Aircraft) | 28 |
| 8.1.1 | Agenda del taller | 28 |
| 8.1.2 | Programa detallado..... | 29 |
| 8.2 | Anexo 2. Curso de planeación y producción de aerofotomosaicos georeferenciados con vehículos aéreos no tripulados..... | 35 |
| 8.2.1 | Memoria fotográfica..... | 35 |
| 8.2.2 | Introducción | 42 |
| 8.2.3 | Objetivo..... | 43 |
| 8.2.4 | Programa del curso | 43 |
| 8.2.5 | Desarrollo de los trabajos | 44 |
| 8.2.6 | Preparativos preliminares | 44 |
| 8.2.7 | Resultados..... | 46 |
| 8.2.8 | Memoria fotográfica..... | 48 |
| 8.3 | Anexo 3. Curso Teórico-Práctico de pilotaje remoto e instrumentación para Vehículos Aéreos No Tripulados | 54 |
| 8.3.1 | Antecedentes | 54 |
| 8.3.2 | Introducción | 55 |
| 8.3.3 | Objetivo general..... | 56 |
| 8.3.4 | Desarrollo de los trabajos | 58 |
| 8.3.5 | Resultados..... | 59 |
| 8.3.6 | Memoria fotográfica..... | 60 |
| 8.4 | Anexo 4. Aplicaciones | 74 |
| 8.4.1 | Elaboración de planos topográficos..... | 74 |
| 8.4.2 | Diagnóstico y monitoreo de la infraestructura hidroagrícola..... | 76 |
| 8.4.3 | Caracterización parcelaria: obtención precisa de parámetros de suelo con fines de diseño de riego..... | 78 |
| 8.5 | Anexo 5. Artículo enviado a la revista Tecnología y Ciencias del Agua... 93 | |
| 8.5.1 | Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola | 93 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 8.6 | Anexo 6. Ponencias presentadas al I Congreso Nacional de Riego y Drenaje, COMEII 2015 | 112 |
| 8.6.1 | Los vehículos aéreos no tripulados y la agricultura de precisión | 112 |
| 8.6.2 | Agricultura de precisión mediante el uso de tecnologías geoespaciales..... | 132 |
| 8.6.3 | Determinación de la humedad del suelo mediante el uso de sensores remotos | 150 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 2.1 Fotografía obtenida en las pruebas de manejo en el lago Pátzcuaro..... | 11 |
| Figura 2.2 Ortomosaico obtenido de las pruebas en Mariquita, Sinaloa..... | 11 |
| Figura 2.3 Ortofoto obtenida de las pruebas del dron en las instalaciones del IMTA. | 12 |
| Figura 8.1 Imagen del Modelo digital de elevación en 3D de una fuente..... | 46 |
| Figura 8.2 Ortomosaico digital de zona semiurbana de Xochitepec, Morelos. | 60 |
| Figura 8.3 Ubicación de dianas en los puntos de control. | 75 |
| Figura 8.4 Mosaico y Modelo digital del terreno de un canal de riego obtenido mediante el uso de cámaras instaladas en un VANT..... | 76 |
| Figura 8.5 Supervisión de infraestructura hidroagrícola con el uso de VANT. | 76 |
| Figura 8.6 Ortomosaico (a) y modelo de elevación digital (b) del dique 1 del Distrito de Riego 010, Culiacán, Sinaloa, México. | 78 |
| Figura 8.7 Aplicación del primer riego parcelario..... | 80 |
| Figura 8.8 Variabilidad en el avance del agua en los surcos..... | 81 |
| Figura 8.9 Avance del agua en dos tiempos. | 82 |
| Figura 8.10 Representación del inicio de la fase de recesión..... | 83 |
| Figura 8.11 Finalización de la prueba de riego..... | 84 |
| Figura 8.12 Variabilidad en la aplicación del riego por goteo. | 85 |
| Figura 8.13 Imágenes captadas con la cámara en los drones. | 86 |
| Figura 8.14 Representación esquemática del avance y recesión en una parcela tipo. | 87 |
| Figura 8.15 Parcelas seleccionadas para la ejecución del vuelo..... | 87 |
| Figura 8.16 Mosaico representativo del riego por surco y regadera..... | 88 |
| Figura 8.17 Avance del agua en el surco, con la marca a 40 m (a) y la marca de 0-20 m (b)..... | 89 |
| Figura 8.18 a) Hexacóptero fabricado por Dronetools, España, usado para generar las imágenes de este trabajo. b) Clasificación de VANTs tipo multicóptero. | 97 |
| Figura 8.19 Firmas de reflectancia del suelo sin cultivo en comparación con las firmas de reflectancia de un suelo cultivado con papas, adaptado de Mulla (2013). | 100 |
| Figura 8.20 Ortomosaico (a) y modelo de elevación digital (b) del dique 1 del Distrito de Riego 010, Culiacán, Sinaloa, México. | 104 |

| | |
|---|-----|
| Figura 8.21 Mosaico generado de fotografías tomadas desde un VANT tipo hexacóptero durante la aplicación del primer riego usando un sistema de riego por goteo en Chapingo, México..... | 106 |
| Figura 8.22 Variación en la reflectancia de una parcela de papa en función de su estado de desarrollo y fertilización (Ben-Dor, 2010)..... | 114 |
| Figura 8.23 Imágenes multiespectrales captadas por un VANT (Anderson, 2014). | 119 |
| Figura 8.24 a) VANT usado y (b) vista de cuatro cámaras CMOS integradas (Verger <i>et al.</i> , 2104). | 120 |
| Figura 8.25 Sensitividad espectral contrastante de las cuatro bandas asociadas a las cámaras del VANT usado (Verger <i>et al.</i> , 2104). | 120 |
| Figura 8.26 Microdron MD4-1000 volando sobre la zona de estudio (Torres-Sánchez <i>et al.</i> , 2014). | 121 |
| Figura 8.27 Imagen obtenida a 10 m de altura y la imagen después del proceso de clasificación de vegetación Torres-Sánchez <i>et al.</i> (2014). | 121 |
| Figura 8.28 VANT en misión de monitoreo de un viñedo (Johnson <i>et al.</i> , 2003)... | 122 |
| Figura 8.29 Etapas del estudio para calibrar el modelo para estimar el Kc (Fernández-Pacheco <i>et al.</i> , 2014). | 122 |
| Figura 8.30 Resultados obtenidos (Kc y h) con el procesamiento de imágenes (Fernández-Pacheco <i>et al.</i> , 2014). | 123 |
| Figura 8.31 Mapa NDVI en Pseudocolor de una parcela de pasto en tres fechas para el año 2007 (Xiang y Lei, 2011). | 123 |
| Figura 8.32 Rutas de vuelos usados (este-oeste y norte sur) para asegurar gran traslape de imágenes (Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2014). | 124 |
| Figura 8.33 Escena tridimensional generada con métodos de foto-reconstrucción usando plataformas basadas en VANTs (Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2014). | 124 |
| Figura 8.34 Foto-reconstrucción de un árbol obtenida de un VANT (a y c) así como obtenidas con ortomosaicos usando DSM (b y d) para detallar la corona de los árboles (Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2014). | 125 |
| Figura 8.35 VANT usado para la aplicación precisa de agroquímicos (A) equipo de bombeo de pesticidas; (B) caja de controlador (Zhu <i>et al.</i> , 2010). | 125 |
| Figura 8.36 Imágenes aéreas adquiridas con un aeroplano (izquierda) y un VANT (derecha) con árboles sanos (H) e infectados con HLB (D) (Garcia-Ruiz <i>et al.</i> , 2013). | 126 |

| | |
|--|-----|
| Figura 8.37 Imágenes segmentadas en falso color de un árbol sano (a) e infectado (b). Imágenes izquierda obtenidas con un aeroplano y las de la derecha con un VANT (Garcia-Ruiz <i>et al.</i> , 2013)..... | 127 |
| Figura 8.38 Imágenes adquiridas con VANTs en falso color e imágenes con características espectrales significativas de árboles sanos e infectados (Garcia-Ruiz <i>et al.</i> , 2013). | 127 |
| Figura 8.39 Aplicaciones de los sensores remotos en relación a la resolución espacial y temporal requerida (Davis et al. 1991). | 135 |
| Figura 8.40 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. | 141 |
| Figura 8.41 Curva de humedad en función de la profundidad para un suelo de textura franco-arenosa (Fuente: Nuñez et al., 2013) | 153 |
| Figura 8.42 A) Diagrama de un indicador de humedad de neutrones (sonda de neutrones) (Fuente: Arizona Cooperative Extension, 2010); B) Perfil de humedad realizado con la sonda de neutrones (Fuente: Florentino, 2006). | 154 |
| Figura 8.43 Diagrama de los bloques de resistencia (Fuente: Arizona Cooperative Extension, 2010). | 155 |
| Figura 8.44 Diferentes tipos de TDR (Fuente: Muñoz-Carpena, 2004). | 156 |
| Figura 8.45 Partes que involucran la teledetección (Fuente: UNESCO, 2010). | 157 |
| Figura 8.46 Esquema general de los sensores pasivos y activos (Fuente: UNESCO, 2010). | 158 |
| Figura 8.47 Relación entre albedo, diferencia de temperatura máximo diurna e inercia térmica y el contenido de humedad del suelo (Fuente: Hejmanonowska & Mularz, 1996). | 160 |
| Figura 8.48 Mapas de diferentes coberturas identificando suelos húmedos (Castro et al. ,2011)..... | 161 |
| Figura 8.49 Mapas de Suelos húmedos (Fuente: Castro et al. 2011)..... | 162 |
| Figura 8.50 Concepto Artístico del Satélite SMAP (Fuente: NASA, 2015). | 163 |
| Figura 8.51 Mapa de Humedad del suelo, adquiridas entre el 04 de mayo y 11 de mayo de 2015, resolución de 5.6 millas (9 kilómetros) (Fuente: NASA / JPL-Caltech / GSFC, 2015)..... | 164 |

Figura 8.52 Simulación del producto A) nivel 2 y B) nivel 3 de la humedad del suelo;
C) nivel 3 para estado del agua en el suelo (Congelado o no) (Fuente: NASA, 2015).

..... 165

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|-----|
| Cuadro 8.1 Parámetros hidráulicos de suelos agrícola tipo. | 83 |
| Cuadro 8.2 Características de los VANTs equipados con sensores remotos (Blyenburgh, 2013)..... | 98 |
| Cuadro 8.3 Beneficio de los vehículos no tripulados (VANTs) frente a los aviones tripulados (Díaz et al., 2014)..... | 117 |
| Cuadro 8.4 Índices de vegetación más utilizados en la agricultura de precisión (Mulla, 2013)..... | 136 |
| Cuadro 8.5 Principales sistemas satelitales usados en AP (Mulla, 2013; DigitalGlobe, 2015)..... | 137 |
| Cuadro 8.6 Producto de datos obtenidos con SMAP (Fuente: NASA, 2015)..... | 164 |
| Cuadro 8.7 Aplicaciones probables y potenciales con la ayuda del satélite SMAP (Fuente: NASA, 2015)..... | 166 |

RESUMEN

El monitoreo de las variables de sistema agua-suelo-planta-atmosfera para la gestión de las zonas agrícolas, consume gran cantidad de tiempo, recursos económicos, instrumentales y humanos, debido a la alta frecuencia de información de variables que requieren, aunado a la dificultad de acceso a las zonas de producción, provoca que frecuentemente el monitoreo de éstas variables sea deficiente, disperso y requiere de un tratamiento previo para revisar la calidad y validación espacial y temporal. Para resolver este problema se empiezan a utilizar tecnologías nuevas o mejoradas, de alto potencial que facilitan la toma, procesamiento y despliegue de imágenes espaciales y temporales mediante el uso de satélites, aviones y vehículos aéreos no tripulados (VANTs).

Ante la necesidad de aplicar éstas nuevas herramientas tecnológicas, como los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realizó un proyecto para generar y validar aplicaciones potenciales en las áreas de riego y drenaje. En 2014, en una primera aproximación a los VANTs se documentaron varias aplicaciones que facilitarían el acopio de información espacial y temporal de interés para la Coordinación de Riego y Drenaje. Para el año 2015, se capacitó en su uso y manejo, así como en el desarrollo de aplicaciones y su validación en campo para obtener imágenes y datos con fines de monitoreo, seguimiento y evaluación del riego parcelario, supervisión de la infraestructura hidroagrícola en zonas de riego y en la elaboración de planos topográficos.

Complementariamente, se capacitaron especialistas de la Coordinación de Riego y Drenaje en uso de drones, su normatividad y el manejo de VANTs con el curso "Remotely Piloted Aircraft (RPA)". Para desarrollo de capacidades en pilotaje y uso de la instrumentación del VANT se tomó el curso "Piloteo remoto e instrumentación para VANTs". Finalmente, para el procesamiento de las imágenes obtenidas se tomó el curso "Planeación y producción de aerofotomosaicos georeferenciados con VANTs".

1 ANTECEDENTES

La agricultura convencional es un sistema de producción en el que los insumos se aplican de forma uniforme en toda la superficie, sin tomar en cuenta la variabilidad espacial de los factores involucrados en el manejo del cultivo. Ello conlleva un gasto innecesario y un aumento potencial del deterioro medioambiental por agotamiento de la fertilidad o del agua disponible para riego, y por contaminación de suelos y acuíferos, entre otros problemas.

El monitoreo de las variables de sistema agua-suelo-planta-atmosfera, de interés para la gestión de las zonas agrícolas del país, consume tiempo y recursos económicos, instrumentales y humanos, por la cantidad de datos que requieren, aunado a la dificultad para acceso a zonas agrícolas, por lo que frecuentemente el monitoreo de variables de interés agrícola es deficiente, disperso y requiere de un tratamiento previo para revisar su calidad y realizar una interpolación espacial y temporal. Por ejemplo, la estimación de la superficie sembrada, siniestrada, regada, y cosechada en un ciclo agrícola es un dato de suma importancia para la planificación y distribución de los recursos hídricos y económicos destinados a la agricultura (Shafian y Valadanzouj, 2007). Para resolver este problema se están empezando a utilizar herramientas nuevas e innovadoras de alto potencial que permiten una mejora sustancial de la productividad agrícola. Es el caso de la teledetección, con la que se puede obtener información sobre el estado de los cultivos mediante el uso de satélites, aviones y vehículos aéreos no tripulados (VANTs).

Los VANTs son una alternativa actual para estimar en forma remota variables de interés agrícola, de alta variabilidad espacial y temporal.

Las principales potencialidades de los VANTs en la agricultura son la precisión espacial y la disponibilidad temporal con la que se toman los datos, éstos facilitan la capacidad de observar una explotación agrícola desde el aire en un periodo determinado.

Los VANTs pueden proporcionar información sobre el estado hídrico de los cultivos, su grado de desarrollo vegetativo y su estado sanitario, que se puede obtener en tiempo real, para poder modificar la fecha y cantidad de aplicación de riegos, fertilizaciones y/o tratamientos sanitarios, en las zonas agrícolas donde se detecten dichas necesidades y en el momento que se considere más adecuado.

Además, los VANTs pueden volar de forma autónoma a baja altura y con grandes traslapes, que permiten la adquisición de imágenes de ultra-alta resolución espacial (en el rango de unos pocos centímetros) y generar un modelo digital de superficie (DSM por sus siglas en inglés) usando métodos de foto reconstrucción que se basan en el enfoque de "Estructura del Movimiento" para la reconstrucción 3-D.

Ante la necesidad de aplicar nuevas herramientas tecnológicas como los vehículos aéreos no tripulados (VANT), el instituto mexicano de tecnología del agua (IMTA) requirió conocer las aplicaciones potenciales de dichos vehículos en las áreas de riego y drenaje. Los VANTs han sido estudiados y aplicados en el mundo desde hace más de 15 años, sin embargo, su aplicación agrícola en México es prácticamente inexistente. Para contribuir a su desarrollo en el país, el presente proyecto contempla definir su aplicación potencial en las actividades asociadas al riego y drenaje.

En 2014, en una primera aproximación a los VANTs se documentaron varias aplicaciones que facilitarían el acopio de información espacial y temporal de interés para la Coordinación de Riego y Drenaje. Para el año 2015, se capacitó en su uso y manejo, así como en el desarrollo de aplicaciones y su validación en campo para obtener imágenes y datos con fines de monitoreo, seguimiento y evaluación del riego parcelario, supervisión de la infraestructura hidroagrícola en zonas de riego y en la elaboración de planos topográficos.

El objetivo del proyecto fue desarrollar aplicaciones para el uso de VANTs con fines de adquisición remota de datos en actividades de interés para ingeniería de riego y supervisión de infraestructura hidroagrícola en zonas de riego.

A continuación se describen las actividades involucradas en el desarrollo de los productos comprometidos.

2 ACTIVIDADES REALIZADAS

2.1 Capacitación en el uso y manejo de VANTs

Se capacitó a personal de la Coordinación de Riego y Drenaje en el uso y manejo de dos VANTs adquiridos por el IMTA, a través de los siguientes cursos talleres:

- i) Curso de RPA (Remotely Piloted Aircraft) (documentado en la sección 4.1).
- ii) Curso de planeación y producción de aerofotomosaicos georeferenciados con vehículos aéreos no tripulados (sección 4.2).
- iii) Curso teórico practico de pilotaje remoto e instrumentación para vehículos aéreos no tripulados (sección 4.3).

En apoyo a la capacitación se realizaron pruebas de manejo de VANTs en zonas de riego de: Culiacán, Los Mochis, Módulo Santa Rosa del DR 075 Río Fuerte, Pátzcuaro, y la zona cañera en el estado de Morelos.



Figura 2.1 Fotografía obtenida en las pruebas de manejo en el lago Pátzcuaro.



Figura 2.2 Ortomosaico obtenido de las pruebas en Mariquita, Sinaloa.



Figura 2.3 Ortofoto obtenida de las pruebas del dron en las instalaciones del IMTA.

Además, se asistió a un congreso nacional, a eventos de interés y se tomaron tres talleres, para desarrollar capacidades en el uso y manejo de VANTs.

2.2 Desarrollo y puesta en marcha de aplicaciones en Riego y Drenaje

Se revisó bibliografía especializada relacionada con el uso de VANTs en tres áreas potenciales para la Coordinación de Riego y Drenaje. Primeramente, la cuenca de abastecimiento de la zona de riego que es donde se localiza la fuente de agua; segundo, la infraestructura necesaria para conducir el agua hasta la parcela y por último las parcelas.

Se revisaron y desarrollaron tres aplicaciones sobre el uso de VANTs en las áreas de interés de la Coordinación de Riego y Drenaje.

- i) Obtención de planos topográficos.
- ii) Supervisión de infraestructura hidroagrícola.
- iii) Obtención de curvas de avance-recesión en riego por gravedad.

2.3 Documentación de aplicaciones en Riego y Drenaje

Se redactó un documento técnico donde se describen las bases teóricas, metodologías, materiales y equipos necesarios para las tres aplicaciones seleccionadas, los cuales se presentan en el capítulo 5.

En lo que respecta a la difusión de la documentación se presentaron tres ponencias en un Congreso Nacional (I Congreso Nacional de Riego y Drenaje, COMEII 2015), y se elaboró un artículo científico presentado en la revista de Tecnología y Ciencias del Agua, y se publicó en la web un video sobre las actividades que realiza la Coordinación con respecto a los VANTs, como se presenta en el capítulo 6.

3 RESULTADOS OBTENIDOS

En el marco del proyecto se generaron los siguientes productos:

- i) Tres aplicaciones potenciales de los VANTs en riego y drenaje.
 - a. Obtención de planos topográficos (sección 5.1).
 - b. Supervisión de infraestructura hidroagrícola (sección 5.2).
 - c. Obtención de curvas de avance-recesión en riego por gravedad (sección 5.3).
- ii) Informe sobre aplicaciones desarrolladas sobre el uso de VANTs en riego y drenaje. Éste informe forma parte de la documentación de todas las actividades realizadas en el proyecto.

4 CAPACITACIÓN EN EL USO Y MANEJO DE VANTs

4.1 Curso de RPA (Remotely Piloted Aircraft)

Existe un nuevo paradigma en la agricultura, y el IMTA no es ajeno a ese proceso de transformación. La Agricultura de Precisión es el motor de desarrollo de estas innovaciones que no se detiene en la búsqueda de mayor eficiencia y sustentabilidad.

Los sensores remotos puestos en VANTs son una tecnología de vanguardia que llegó para sumar importantes beneficios al campo, ya que permite el manejo y control de variables, trazabilidad y certificación de procesos.

Por lo anterior durante los días del 17-21, 26 y 27 del mes de marzo del presente año, se realizó el primer curso de RPA (Remotely Piloted Aircraft) celebrado en el centro de capacitación del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). El evento fue organizado por la Coordinación de Riego y Drenaje.

El evento tuvo el apoyo de la empresa Dronetools SL, empresa que ha logrado importantes avances en investigación sobre el uso de VANTs para la producción agrícola. La empresa también presentó sus novedades y se realizaron demostraciones de vuelos, con captura y procesamiento de imágenes aéreas. El Ingeniero Jorge Gutiérrez Riego cofundador y director técnico de Dronetools fue el instructor encargado.

El curso tuvo como objetivo formar adecuadamente a pilotos de Aeronaves no tripuladas, para que el desempeño de sus funciones se pueda desarrollar en un entorno de conocimiento amplio y seguro, teniendo en cuenta el espacio aéreo en el que se opera.

El curso integró capacitación teórica y práctica con demostraciones de vuelo del equipo. El programa incluyó temas relacionados a las utilidades de los equipos, la importancia de la recopilación de datos con VANTs, las oportunidades y limitaciones en el uso de los mismos para la producción agrícola, la arquitectura interna y un análisis comparativo de los diferentes equipos (aviones, helicópteros y multicopteros), resumen de software utilizados y hasta la actualización legislativa que regula el uso de VANTs.

En las demostraciones de campo se presentó el reciente VANT adquirido por el IMTA, que consiste en un hexacóptero al cual se le instalaron dos cámaras que son accionadas remotamente.

4.2 Curso de planeación y producción de aerofotomosaicos georeferenciados con vehículos aéreos no tripulados

Este curso fue dirigido a un grupo de especialistas de la Coordinación de Riego y Drenaje del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), para el desarrollo de conocimientos y habilidades prácticas y teóricas sobre las tecnologías geoespaciales.

Esta actividad se desarrolló en el centro de capacitación. El geógrafo Arturo Cruz García quien pertenece a la empresa Terrasat Cartografía S.A. de C.V. fue el instructor encargado. Esta empresa Mexicana está posicionada como empresa líder en Latinoamérica en enseñanza de Sistemas de Información Geográfica y Sistemas de Posicionamiento Global.

El objetivo principal del curso fue proporcionar elementos teóricos-metodológicos y prácticos para el desarrollo y manejo de imágenes aéreas adquiridas a través de VANTs para la realización de fotomosaicos georeferenciados que permitan la toma de decisiones estratégicas sobre las zonas de estudio.

Las primeras horas fueron de exposición por parte del experto en el tema, quien hizo uso de material visual proyectado, posteriormente se realizó una introducción a los elementos básicos y el resto del curso fue práctico. Se realizaron prácticas en los alrededores de la sala de capacitación.

Los temas principales que se abordaron durante el curso fueron:

- i. Fundamentos de inteligencia y tecnología geoespacial.
- ii. Especificaciones geodésicas y cartográficas en México.
- iii. Análisis de las características, ventajas y desventajas de la percepción remota pasiva de alta resolución, fotogrametría y los aerofotomosaicos georeferenciados, y ortofotos generados por plataformas aéreas ligeras y vehículos aéreos no tripulados.
- iv. Conceptos, clasificación y características principales de los vehículos aéreos no tripulados.

- v. Definición de los requerimientos geoespaciales para la realización de un proyecto de generación de cartografía por medio de vehículos aéreos no tripulados.
- vi. Descripción de los requerimientos técnicos para elaborar aerofotomosaicos georreferenciados y ortofotos con vehículos aéreos no tripulados: a) vehículo aéreo no tripulado; b) cámara fotográfica digital; c) receptor GPS; d) programas y equipo de cómputo y elementos de interconexión.
- vii. Esquema metodológico para el desarrollo de un proyecto de obtención de aerofotomosaicos georreferenciados.
- viii. Montaje y realización de demostración de vuelo aéreo con vehículo aéreo no tripulado.
- ix. Procesamiento de las fotografías para realizar un aerofotomosaico georreferenciado.
- x. Evaluación de la exactitud posicional del aerofotomosaico georreferenciado.

4.3 Curso teórico-práctico de pilotaje remoto e instrumentación para vehículos aéreos no tripulados

El VANT es la plataforma para "transportar" el equipo, mediante el cual se lleva a cabo el registro y almacenamiento de datos, ya sea en forma escalar o vectorial para la implementación, seguimiento y análisis de procesos a evaluar.

Ante un mercado emergente y dinámico de VANTs existentes en México, restringido a aplicaciones de filmación comercial y seguridad pública, y dada la necesidad del IMTA de contar con los equipos más avanzados que permitan un mejor análisis de la información requerida para sus actividades, es imprescindible una continua actualización de equipo y software.

Para el desarrollo de estas actividades, en ocasiones se hace necesaria la subcontratación de servicios, como topografía, procesamiento y análisis de imágenes. Para lo cual los VANTs son una herramienta cada vez más necesaria, sin embargo se requiere de personal capacitado para su uso, para lo anterior durante los días 25-30 del mes de noviembre del 2015, se realizó el curso teórico-práctico organizado por la Coordinación de Riego y Drenaje denominado "pilotaje remoto e instrumentación para vehículos aéreos no tripulados" celebrado en las instalaciones del IMTA.

El curso fue dirigido a un grupo de especialistas de la Coordinación de Riego y Drenaje del IMTA, para el desarrollo de habilidades en el piloteo de VANTs. El curso estuvo a cargo de la empresa John Holloway & Associates de Mexico S.A. de C.V. Se completaron 16 horas teóricas y 24 horas prácticas.

El objetivo del curso fue la capacitación a un grupo de 6 especialistas de la Coordinación de Riego y Drenaje en Piloteo remoto e instrumentación para Vehículos Aéreos No Tripulados.

En la introducción del curso los instructores se presentaron, proporcionando su profesión, área de trabajo y experiencia en el uso de VANTs. Como introducción al curso se abarcaron las principales características de los VANTs y los equipos fotográficos para la adquisición de imágenes. Siguiendo con la capacitación se hizo una revisión del software Uthere Ground Control requerido para la elaboración de planes de vuelo. En los restantes días, el curso se centró en la ejecución de prácticas de vuelo para la toma de las fotografías aéreas.

Algunas de las prácticas realizadas en el curso fueron:

- i) Realización de misiones.
- ii) Prevuelo y calibración del VANT de ala fija.
- iii) Procedimientos para el primer vuelo.
- iv) Procedimientos de conexión entre Estación de Tierra y el VANT.
- v) Procedimiento de despegue y manejo del VANT de ala fija mediante el radio control.
- vi) Procedimiento de manejo del VANT mediante Ground Control (uso de laptop).
- vii) Procedimientos de aterrizaje.

5 DESARROLLO Y PUESTA EN MARCHA DE APLICACIONES EN RIEGO Y DRENAJE

En términos de una zona de riego, idealmente se pueden identificar tres grandes áreas de interés. Primeramente la cuenca de abastecimiento de la zona de riego que es donde se localiza la fuente de agua, posteriormente la infraestructura necesaria para conducir el agua hasta la parcela y por último las parcelas. En la zona de riego específica, hay una serie de acciones requeridas para la operación de la zona y manejo de los recursos para cumplir con el servicio de riego de manera óptima. El área de aplicación de riego y drenaje para el IMTA involucra además de las actividades parcelarias, el proceso de programación y distribución del agua desde la fuente hasta la parcela.

A nivel parcela, la aplicación de los insumos y manejo de los recursos, entre ellos la aplicación del riego, son tareas que requieren del uso óptimo de recursos humanos y económicos. El uso de VANTs puede aportar ventajas en estas actividades, ya que en cada una de estas es posible su uso. En lo que respecta discretización del terreno para la aplicación de insumos, mediante el uso de VANTs es posible llevar un seguimiento puntual de las variaciones que pueden existir debido a las necesidades cambiantes de las plantas en función de la fenología, lo que representa un ejemplo claro de la agricultura de precisión.

5.1 Obtención de planos topográficos

La construcción del conjunto de los canales de riego es una de las partes más significativas en el costo de la inversión inicial del sistema de riego, por lo tanto se requiere contar con un levantamiento topográfico de alta precisión y detalle que se puede obtener a partir de fotogrametría con fotografías obtenidas con cámaras instaladas en VANT es posible.

El procedimiento para la generación de información topográfica para el diseño y monitoreo de la infraestructura hidro-agrícola mediante fotogrametría utilizando fotografías aéreas tomadas por las cámaras que van instaladas en los VANT se encuentra detallado en el Anexo 4, subcapítulo 8.4.1.

5.2 Supervisión de infraestructura hidroagrícola

Para utilizar de manera más eficiente el recurso agua, desde la red de conducción y distribución hasta la parcela, es imprescindible que la infraestructura concesionada en los distritos de riego este en buenas condiciones por lo que se requiere realizar actividades de supervisión periódica de los canales, drenes, pozos, presas y compuertas, estas actividades pueden ser cubiertas de manera óptima con el uso de cámaras fotográficas instaladas en un VANT.

Las imágenes aéreas y la percepción remota se han utilizado en el pasado para monitorear la infraestructura, como se reporta en (Huang, Fipps, Maas & Fletcher, 2009). Esta aplicación se describe de manera detallada en el Anexo 4, subcapítulo 8.4.2.

5.3 Obtención de curvas de avance-recesión en riego por gravedad

Una de las tecnologías que se ha extendido al campo hidroagrícola es el uso de vehículos aéreos no tripulados. En el ámbito agrícola, se está adaptando en actividades de reconocimiento y corrección a nivel parcela, detección de zonas erosionadas, cultivos siniestrados, etc.

En el diseño de riego por gravedad, se aplicó el uso de drones en el seguimiento del riego en las pruebas de campo correspondiente, con el objetivo de generar una metodología que permita su caracterización parcelarias, en particular su estimación de la curva avance recesión del riego usando imágenes fotográficas activadas desde una plataforma móvil, específicamente un dron. La metodología obtenida se detalla en al Anexo 4, subcapítulo 8.4.3.

6 DIFUSIÓN DE APLICACIONES Y DOCUMENTOS DEL PROYECTO

6.1 Videos

Para la difusión de proyecto se hizo público un video que describe el problema que se enfrenta en la adquisición de imágenes aéreas de alta resolución y como el IMTA plantea resolver este problema, recientemente el IMTA adquirió un VANT tipo multicóptero el cual es una herramienta de última generación con la que se tiene la posibilidad de desarrollar aplicaciones con fines de adquisición remota de datos en actividades de interés para ingeniería de riego y la supervisión de infraestructura hidroagrícola en zonas de riego en tiempo real. Aunado a esto, se ha dado a la tarea de capacitar a su personal tanto en el manejo tanto del VANT como de los softwares requeridos para el post-procesamiento de las imágenes aéreas obtenidas.

En el video “El IMTA incursiona en el uso de vehículos aéreos no tripulados en ingeniería de riego” (<https://www.youtube.com/watch?v=Jts7oL6SAsc>) se pueden ver los inicios del IMTA en el uso de VANTs, así como los retos que enfrenta.

6.2 Artículo enviado a revista Tecnología y Ciencias del Agua

Con el fin de dar a conocer los avances de este proyecto y las relaciones con la agricultura se presentó un artículo a la revista de Tecnología y Ciencias del Agua, véase Anexo 5, a continuación se presenta una descripción general:

6.2.1 Aplicaciones de los Vehículos Aéreos No Tripulados en la ingeniería hidroagrícola

Éste artículo fue enviado a la revista Tecnología y Ciencias del Agua, con número de aceptación 0346NS.

Resumen

El monitoreo remoto de variables agrícolas sigue siendo un reto actual ante los altos costos que representa la adquisición manual de datos con alta frecuencia. A partir de la década de los 70s, la puesta en órbita de satélites ha facilitado el monitoreo de

la superficie terrestre, incorporando tecnología de sensores remotos para mejorar los métodos de análisis, procesamiento y despliegue de información espacial de variables de interés hidroagrícola. Sin embargo, ante la demanda de información detallada, los satélites tienen la limitante de suministrar información temporal discontinua e información espectral de baja resolución. Una alternativa emergente la proporcionan los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) o más comúnmente llamados drones. Ante el gran desarrollo que presentan los VANTs, es de utilidad conocer las principales características y componentes de los drones utilizados con fines agrícolas, los trabajos relacionados y su uso potencial en las diferentes áreas de aplicación hidroagrícola.

6.3 Ponencias presentadas en el I Congreso Nacional de Riego y Drenaje

Con el fin de dar a conocer los avances de este proyecto y las relaciones con la agricultura se realizaron diversas ponencias que fueron presentadas en diversos simposios celebrados en universidades e instituciones gubernamentales, una de ellas fue en el I Congreso Nacional de Riego y Drenaje, COMEII 2015, organizado por el Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación. A.C. (COMEII). A continuación se hace una descripción general de las ponencias presentadas como resultado del proyecto y su contenido completo se puede ver en el Anexo 6 de este informe.

6.3.1 Ponencia I

Se presentó en el primer Congreso Nacional de Riego y Drenaje la ponencia titulada *“Los vehículos aéreos no tripulados y la agricultura de precisión”* donde se hizo un análisis de las aplicación de los drones o VANTs como una herramienta de apoyo para la agricultura de precisión y se concluyó que los VANTs facilitan el monitoreo frecuente de variables que demanda la agricultura de precisión para ejecutar procesos eficientes con menor costo y tiempo y mayor resolución que los métodos convencionales.

Resumen

El desarrollo de las tecnologías de información y comunicación empieza también a impactar a los sistemas productivos agrícolas, lo que ha traído nuevas alternativas

para la mejora de procesos y tareas agrícolas que demandan grandes volúmenes de información para su mejor planeación, administración, gestión, y evaluación. Con la puesta en órbita de satélites se facilitó el monitoreo de la superficie terrestre al capturar imágenes espectrales e incorporar nuevos métodos de análisis, procesamiento y despliegue de información espacial de variables de interés agrícola. Sin embargo, ante la demanda de información detallada, los satélites tienen la limitante de suministrar información temporal discontinua y de baja resolución. Ante estas limitaciones, el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) equipados con sensores multifuncionales pequeños, complementados con sistemas de navegación autónoma, es una alternativa viable de bajo costo para monitorear zonas agrícolas. La agricultura de precisión se basa en efectuar la aplicación correcta de insumos agrícolas, en el momento adecuado, en el lugar preciso, y con la dosis de óptima demandada por los cultivos apoyada con herramientas que facilitan el monitoreo frecuente y la automatización de los procesos requeridos. Siendo las variables de interés agrícola, que definen la producción y desarrollo de los cultivos, de alta variabilidad espacial y temporal, en este trabajo se analiza y documenta la aplicación de los drones o VANTs como una herramienta de apoyo para la agricultura de precisión.

6.3.2 Ponencia II

Se presentó en el primer Congreso Nacional de Riego y Drenaje la ponencia titulada *“Agricultura de precisión mediante el uso de tecnologías geoespaciales”* donde se expone la relevancia de los VANTs en la agricultura de precisión (AP), y concluyendo que los VANTs como 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.

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.

6.3.3 Ponencia III

Se presentó en el primer Congreso Nacional de Riego y Drenaje la ponencia titulada *“Determinación de la humedad del suelo mediante el uso de sensores remotos”* donde menciona que los sensores remotos brindan información para determinar y monitorear el contenido de humedad en el suelo en áreas relativamente grandes, con el fin de obtener información que ayude a una mejor gestión de los recursos hídricos. Por lo tanto se concluye que si las imágenes provienen de los sensores remotos puesto en los VANTs los parámetros para determinar el contenido de humedad en el suelo son de mayor precisión y detalle.

Resumen

El contenido de humedad en el suelo es un parámetro importante para la planificación adecuada del riego, conocer su evolución en tiempo y espacio es de vital importancia para estimar el agua requerida por los cultivos. Para su estimación existen diversos métodos directos e indirectos tales como: gravimétrico, sonda de neutrones, resistencia eléctrica, TDR, mediante sensores remotos, etc. Los métodos directos sólo permiten estimaciones puntuales, con un alcance espacial y temporal muy restringido. Estas limitantes han sido abordadas con el desarrollo de métodos indirectos basados en sensores remotos montados en satélites y vehículos aéreos (tripulados y no tripulados), los cuales cubren extensas superficies agrícolas y son capaces de estimar variables que muestran alta variabilidad. En este trabajo se revisan dos métodos para estimar la humedad del suelo utilizando sensores remotos montados en satélites: el primero utiliza imágenes de la serie Landsat (NASA, 2011) y cuantifica la humedad en función de índices espectrales; el segundo se basa en las imágenes del satélite lanzado por la NASA en Enero del 2015, Soil Moisture Active Passive (SMAP), el cual cuenta con dos sensores (radiómetro y radar), que brindan imágenes de la tierra cada 12 horas, las imágenes de ambos sensores se combinan para obtener una estimación de la humedad del suelo en los 5 primeros centímetros de profundidad, a un periodo de 3 días a 9 km de resolución espacial. Estos métodos permiten mejorar la planificación del riego, determinar rendimientos y monitorear la ocurrencia potencial de sequías, inundaciones e incendios.

7 LITERATURA CONSULTADA

- Alegría H.A., Bidleman T.F. y Salvador-Figueroa M. (2006). Organochlorine pesticides in the ambient air of Chiapas, Mexico. *Environ. Pollut.* 140, 483–491.
- Cheng H.H. (1990). Pesticides in the soil environments –An overview. En: *Pesticides in the soil environment: processes, impacts, and modelling.* (H. Cheng, Ed.). Soil Science Society of America, book series No. 2, Madison, WI, pp. 1–5.
- Chen J., Liu C., Yang Z. y Wang J. (2008). Residues and characteristics of organochlorine pesticides in the surface water in the suburb of Beijing. *Earth Sci. Front.* 15, 242–247.
- CONAGUA (2008). Estadísticas del agua en México. Actualizado al mes de agosto de 2009. Comisión Nacional del Agua. México, D.F. CD-ROM.
- Dubus I.G., Hollis J.M. y Brown C.D. (2000). Pesticides in rainfall in Europe. *Environ. Pollut.* 110, 331–344.
- Fytianos K., Meesters R.J.W., Schröder H.Fr., Gouliarmou B. y Gantidis N. (2006). Concentration and distribution of organochlorine pesticides in surface water and sediments in Lake Volvi (northern Greece). *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 86, 109–118.
- Gelover S., Bandala E.R., Leal-Ascencio T., Pérez S. y Martínez E. (2000). GC-MS determination of volatile compounds in drinking water supplies in Mexico. *Environ. Toxicol* 15, 131–139.
- Gilliom R.J. (2007). Pesticides in U.S. streams and groundwater. *Environ. Sci. Technol.* 41, 3409–3414.
- Hoai P.M., Ngoc N.T., Minh N.H., Viet P.H., Berg M., Alder A.C. y Giger W. (2010). Recent levels of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in sediments of the sewer system in Hanoi, Vietnam. *Environ. Pollut.* 158, 913–920.
- Hong S.H., Kim U.H., Shim W.J., Oh J.R., Viet P.H. y Park P.S. (2008). Persistent organochlorine residues in estuarine and marine sediments from Ha Long Bay, Hai Phong Bay, and Ba Lat Estuary, Vietnam. *Chemosphere* 72, 1193–1202.
- Jiménez B. (2005). Treatment technology and standards for agricultural wastewater reuse: a case study in Mexico. *Irr. Drainage.* 54, S23–S33.
- Kishida M., Imamura K., Maeda Y., Lan T.T.N., Thao N.T.P. y Viet P.H. (2007). Distribution of persistent organic pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment samples from Vietnam. *J. Health Sci.* 53, 291–301.

- Méndez–García L., Rodríguez–Domínguez L. y Palacios–Mayorga S. (2000). Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales en suelos. *Terra* 18, 279–288.
- Ongley E.D. (1996). Control of water pollution from agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 55. Roma, Italia, 111 pp.
- Pérez, H. R. 1992. Tesis presentada en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. ISCAH. 135 pp.
- Ramírez Q.Y., López G.E., Barceló Q.I.D. y Domínguez E.Z.J. (2008). Caracterización de triazinas en la cuenca alta del Río Lerma en Estado de México, México. Memorias. XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Santiago de Chile. 12 al 15 de octubre, 2008. CD-ROM.
- Rodríguez, J. A. et al. 1997. Metodología para el diseño hidráulico y la evaluación de las terrazas arroceras. IIRD. Ciudad de la Habana, 46 pp.
- Rosales–Hoz L., Carranza–Edwards A. y López–Hernández M. (2000). Heavy metals in sediments of a large, turbid tropical lake affected by anthropogenic discharges. *Environ. Geol.* 39, 378–383.
- Shafian S. and Valadanzouj M. (2007) 'Assessment Crop Yield Estimation Methods by Using Satellite Images and Ground Observation', <http://www.aars-acrs/acrs.proceedings2007.php>
- SENER (2007). Anuario estadístico de la industria petroquímica. Secretaría de Energía. México, D.F. 289 pp.
- USEPA (2010). Types of Pesticides. United States Environmental Protection Agency [en línea]. <http://www.epa.gov/pesticides/about/types.htm>.
- Utah State University. 1989. SIRMOD (Surface Irrigation Simulation Software). Department of Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University, Logan Utah, USA.
- Wong F., Alegria H.A., Jantunen L.M., Bidleman T.F., Salvador–Figueroa M., Gold–Bouchot G., Ceja–Moreno V., Waliszewski S.M. y Infanzon R. (2008). Organochlorine pesticides in soils and air of Southern Mexico: Chemical profiles and potential for soil emissions. *Atmos. Environ.* 42, 7737–7745.

8 ANEXOS

8.1 Anexo 1. Curso de RPA (Remotely Piloted Aircraft)

Lugar del evento: Centro de capacitación del IMTA y varias zonas agrícolas

Fecha: 17- 21, 26 y 27 de Marzo del 2015

Instructor: Ing. Jorge Gutiérrez Riego (DroneTools SL España)

8.1.1 Agenda del taller

| DÍA | LUGAR | PROGRAMA | HORARIO |
|----------------|---------------|--|-------------|
| 1 | AULA | Presentación e introducción de los componentes del equipo | 9:00-10:00 |
| | AULA | Factores clave para la realización de un vuelo seguro | 10:00-10:30 |
| | CAMPO | Demostración de vuelo en un campo abierto | 10:30-12:00 |
| | | DESCANSO | 15 min |
| | AULA | Protocolo de vuelo | 12:15-14:00 |
| | | COMIDA | 1 h |
| | AULA | Caracterización de la aeronave | 15:00-16:00 |
| | CAMPO | Formación de vuelo | 16:00-18:00 |
| FIN DE JORNADA | | | |
| 2 | AULA | Utilización de la Ground Station | 9:00-10:00 |
| | AULA | Demostración de software de procesamiento de imágenes | 10:00-12:00 |
| | | DESCANSO | 15 min |
| | CAMPO | Preparación de misión de vuelo | 12:15-14:00 |
| | | COMIDA | 1 h |
| | AULA CAMPO | Armado y activación del paracaídas del dron | 15:00-18:00 |
| FIN DE JORNADA | | | |
| 3 | AULA | Mantenimiento del equipo | 9:00-10:00 |
| | AULA | Uso de la estación de carga | 10:00-11:00 |
| | | DESCANSO | 15 min |
| | AULA | Continuación del uso de la Ground Station: creación de misiones | 12:15-14:00 |
| | | COMIDA | 1 h |
| | CAMPO | Ejecución de misiones de vuelo | 15:00-17:00 |
| | CAMPO | CONCLUSIONES | 17:00-18:00 |
| FIN DE JORNADA | | | |
| 4 | CAMPO | Ejecución de misiones de vuelo en Puente de Ixtla, Morelos | 9:00-17:00 |
| 5 | CAMPO | Continuación de ejecución de misiones de vuelo en Puente de Ixtla, Morelos | 9:00-17:00 |
| 6 | CAMPO | Ejecución de misiones de vuelo en Tezoyuca | 9:00-17:00 |

| | | | |
|---|-------|--|------------|
| 7 | CAMPO | Ejecución de misiones de vuelo en Chapingo, México | 9:00-17:00 |
|---|-------|--|------------|

8.1.2 Programa detallado

Día 1

Presentación e introducción de los componentes del equipo

Un dron o un vehículo aéreo no tripulado (VANT), es sin duda una herramienta que tiene una gran cantidad de aplicaciones. En este apartado de la primera sesión se habló ampliamente de como los VANTs han ido evolucionando según sus aplicaciones. Se tuvo una caracterización a detalle del DroneHexa.

- 1.1 Características generales de un VANT
- 1.2 Aplicaciones de los VANTs de uso general
- 1.3 Aplicación de los VANTs en la agricultura
- 1.4 Evaluación y rentabilidad sobre la aplicación de los VANTs en la agricultura
- 1.5 Equipos comerciales

Factores clave para la realización de un vuelo seguro

Uno de los inconvenientes en la operación del dron es sin duda su vulnerabilidad a varios factores ambientales, aves, aviones, redes eléctricas, y claro la condición misma del equipo, por lo que en esta sesión se habló de las condiciones óptimas tanto del equipo como del clima para realizar un vuelo seguro.

- 1.1 Lugar de despegue
- 1.2 Condiciones climáticas
- 1.3 Estado del equipo

Demostración de vuelo en un campo abierto

Este apartado estuvo dedicado a la forma de operar el dron desde la emisora, para esto se detalló la función o acción de cada una de las palancas de la emisora sobre el dron, desde el acenso, aterrizaje, direccionamiento y cronometraje del tiempo de vuelo del dron.

- 1.1 Descripción y operación de la emisora
- 1.2 Elevación del VANT
- 1.3 Direccionamiento del VANT
- 1.4 Aterrizaje del VANT

Protocolo de vuelo

Este tema estuvo enfocado en las acciones y consideraciones que se deben realizar antes de un vuelo en relación al equipo, se hizo énfasis sobre el orden de encendido y apagado de los equipos, verificación de la calibración del dron y el rango de variación del voltaje de las baterías para su uso, además de la confirmación de conectividad del equipo.

- 1.1 Comprobación y colocación de la carga de las baterías
- 1.2 Calibración de la brújula
- 1.3 Encendido de emisora
- 1.4 Encendido del VANT, Montura y Cámara
- 1.5 Verificación de conectividad

Caracterización de la aeronave

Un dron tiene tres componentes principales para su buen funcionamiento: vehículo aéreo, sensores y actuadores, en este apartado se tuvo una explicación sobre la forma de operación y comunicación del equipo.

- 1.1 Descripción del sistema
- 1.2 Actuaciones y limitaciones de envolvente de vuelo
- 1.3 Comunicaciones

Formación de vuelo

En esta sesión se describió y mostro como es el armado del VANT según las diferentes configuraciones del montaje del equipo, una gran herramienta durante la operación del equipo son los datos de telemetría que se muestran en el monitor de la emisora a lo largo de una misión, de tal manera que se tuvo una descripción de la lectura de datos de vuelo y su interpretación.

- 1.1 Descripción del montaje del VANT
- 1.2 Montaje de baterías en los equipos
- 1.3 Secuencia de encendido de los equipos
- 1.4 Lectura de datos de vuelo en OSD (On Screen Display)
- 1.5 Activación de motores

Día 2

Utilización de la Ground Station

Esta sesión se enfoca al software Ground Station, es mediante este software que se crean las misiones de vuelo que el dron deberá realizar, se abarco de manera general lo que involucra crear una misión en el Ground Station, la comunicación del software con el dron y la emisora y la edición de la misión.

- 1.1 Introducción del software Ground Station
- 1.2 Secuencia para realizar una misión en el Ground Station
- 1.3 Edición de waypoint
- 1.4 Modos de giro
- 1.5 Desplazamiento del VANT: Click and Go
- 1.6 Modo de función de la emisora
- 1.7 Conexión del modem en el PC
- 1.8 Condiciones para la conectividad el VANT al Ground Station
- 1.9 Verificación de la misión

Demostración de software de procesamiento de imágenes

Una vez obtenida la información de las misiones, que en este caso serán imágenes y videos queda la tarea de procesar dicha información, en este apartado se tuvo una explicación del modo de uso de los softwares *Image Composite Editor (ICE)*, *Tetracam PixelWrench* y *Pix4Dmapper*.

- 1.1 Software *Image Composite Editor (ICE)*
- 1.2 Software *Tetracam PixelWrench*
- 1.3 Software *Pix4Dmapper*

Preparación de misión de vuelo

En esta sesión se realizó una planeación de la misión, es decir se ubicó la zona de estudio de interés, se preparó una misión teniendo en consideración cada uno de los detalles del protocolo de vuelo.

- 1.1 Planeación y creación de la misión
- 1.2 Elevación, operación y aterrizaje del VANT
- 1.3 Realización de la misión

Armado y activación del paracaídas del dron

En este apartado se caracterizó el paracaídas a detalle, además se tuvo una demostración del modo de armado y activación del mismo.

- 1.1 Caracterización del paracaídas
- 1.2 Armado del paracaídas
- 1.3 Activación del paracaídas

Día 3

Mantenimiento del equipo

Uno de los puntos importantes que se trataron en esta sesión es el mantenimiento del equipo, para tener el mayor tiempo posible en buen estado los equipos es importante evitar su sobre calentamiento, limpiarlos y saber el momento de la sustitución de cada elemento.

- 1.1 Manejo de baterías
- 1.2 Sustitución de motores y hélices
- 1.3 Lugar de despegue y condiciones climáticas durante el vuelo VANT
- 1.4 Evitar el sobre calentamiento del equipo
- 1.5 Limpieza del equipo

Uso de la estación de carga

Para la recarga de las baterías se cuenta con un cargador Graupner Polaron EX, en esta sesión se explicó la forma de operar el cargador, cargar la base de datos de cada una de las baterías según sus características, y además el mantenimiento del cargador.

- 1.1 Caracterización y especificación del cargador Graupner Polaron EX
- 1.2 Modo de uso de la estación de carga
- 1.3 Mantenimiento de la estación de carga

Continuación del uso de la Ground Station: creación de misiones

En esta sesión se interactuó tanto con el software Ground Station como el dron y la emisora. Se generó una misión y cargo en el dron, para esto se dio una explicación sobre el acomodo de cada una de las palancas en la emisora para evitar que el Ground Station tomara control sobre el dron.

- 1.1 Descripción a detalle de los comandos del Ground Station

- 1.2 Cargado de la misión al VANT
- 1.3 Precauciones al momento de generar una misión de vuelo
- 1.4 Modo de abortar una misión

Ejecución de misiones de vuelo

En esta sesión se realizó una misión de vuelo con el VANT donde se conjuntaron todo los conocimientos adquiridos a lo largo del taller, se partió del protocolo de vuelo, durante el vuelo se tuvo conocimiento de los datos de vuelo y se realizó un posprocesamiento de las imágenes adquiridas.

- 1.1 Preparación de asignación de vuelo por pareja
- 1.2 Interacción de piloto y copiloto en vuelo del VANT con montura de tres ejes.
- 1.3 Preparación del equipo
- 1.4 Cargado de la misión
- 1.5 Elevación del VANT y realización del vuelo
- 1.6 Aterrizaje del VANT y resguardo de la información del vuelo
- 1.7 Almacenamiento del equipo
- 1.8 Posprocesamiento de imágenes

Día 4

Ejecución de misiones de vuelo en Puente de Ixtla, Morelos

Este día consistió en realizar prácticas de vuelo en la zona agrícola de Puente de Ixtla, previo a la visita se realizó una verificación del equipo, durante la vista se programó la misión de vuelo que constipó básicamente toma de imágenes de la zona, se trabajó con la montura de dos ejes y las cámaras visual y multiespectral. Ya terminada la misión se hizo el respaldo de la información para luego realizar el procesamiento de las mismas

- 1.1 Manejos del software Ground Station y creación de misión
- 1.2 Operación del VANT y realización de una misión
- 1.3 Obtención de imágenes y posprocesamiento

Día 5

Continuación de ejecución de misiones de vuelo en Puente de Ixtla, Morelos

Se continuó con las prácticas de vuelo, se realizó una verificación del equipo, programación de la misión de vuelo del dron, ejecución de la misión, respaldo de la información generada y el procesamiento de las imágenes.

- 1.1 Manejos del software Ground Station y creación de misión
- 1.2 Operación del VANT y realización de una misión
- 1.3 Obtención de imágenes y posprocesamiento

Día 6

Ejecución de misiones de vuelos en Tezoyuca

Este día consistió en realizar prácticas de vuelo en la zona agrícola de Tezoyuca, previo a la visita se realizó una verificación del equipo, durante la vista se programó la misión de vuelo que constipó básicamente toma de imágenes de la zona, se trabajó con la montura de dos ejes y las cámaras visual y multiespectral. Ya terminada la misión se hizo el respaldo de la información para luego realizar el procesamiento de las mismas

- 1.1 Manejo del software Ground Station y creación de misión
- 1.2 Operación del VANT y realización de una misión
- 1.3 Obtención de imágenes y pos procesamiento

Día 7

Ejecución de misiones de vuelo en Chapingo, México

Este día consistió en realizar prácticas de vuelo en la zona agrícola de Chapingo, México, previo a la visita se realizó una verificación del equipo, durante la vista se programó la misión de vuelo que constipó básicamente toma de imágenes de la zona, se trabajó con la montura de dos ejes y las cámaras visual y multiespectral. Ya terminada la misión se hizo el respaldo de la información para luego realizar el procesamiento de las mismas

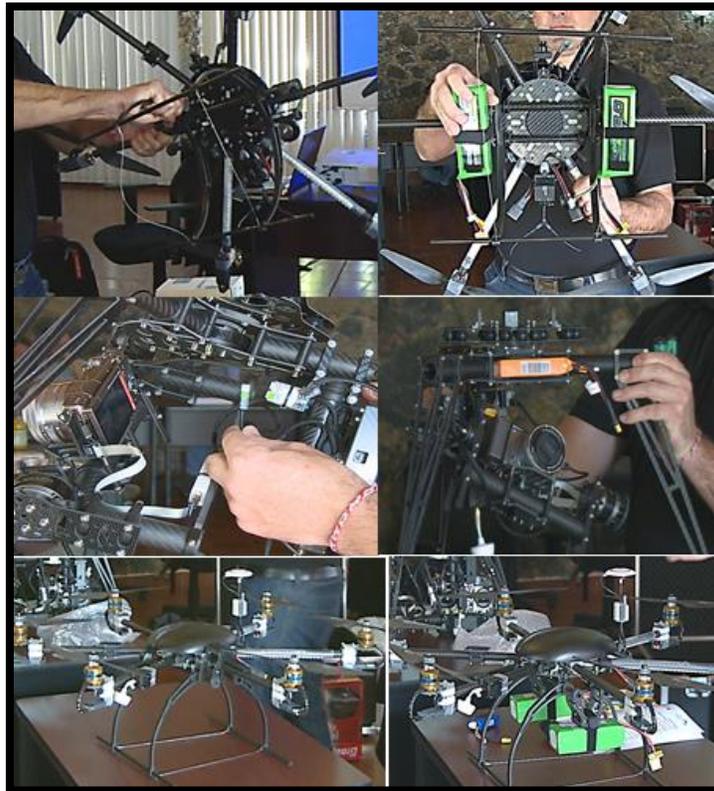
- 1.1 Manejos del software Ground Station y creación de misión
- 1.2 Operación del VANT y realización de una misión
- 1.3 Obtención de imágenes y pos procesamiento

8.2 Anexo 2. Curso de planeación y producción de aerofotomosaicos georeferenciados con vehículos aéreos no tripulados

8.2.1 Memoria fotográfica

Armado del VANT

En esta sesión se presentó de manera práctica el armado del armado del dron bajo diferentes configuraciones.



Prueba de vuelo del VANT

Durante esta prueba de vuelo se tuvo contacto con el manejo del equipo con la finalidad de adquirir práctica en la operación del dron.



Armado y activación del paracaídas

Un equipo importante para el dron es el paracaídas, en esta sesión se caracterizó, armó y accionó el paracaídas.



Pruebas de vuelo en el IMTA

Durante esta prueba de vuelo, el dron se equipó con la montura de tres ejes que permite toma de video, además se utilizó la montura de dos ejes en la que es posible hacer tomas de imágenes multiespectrales.





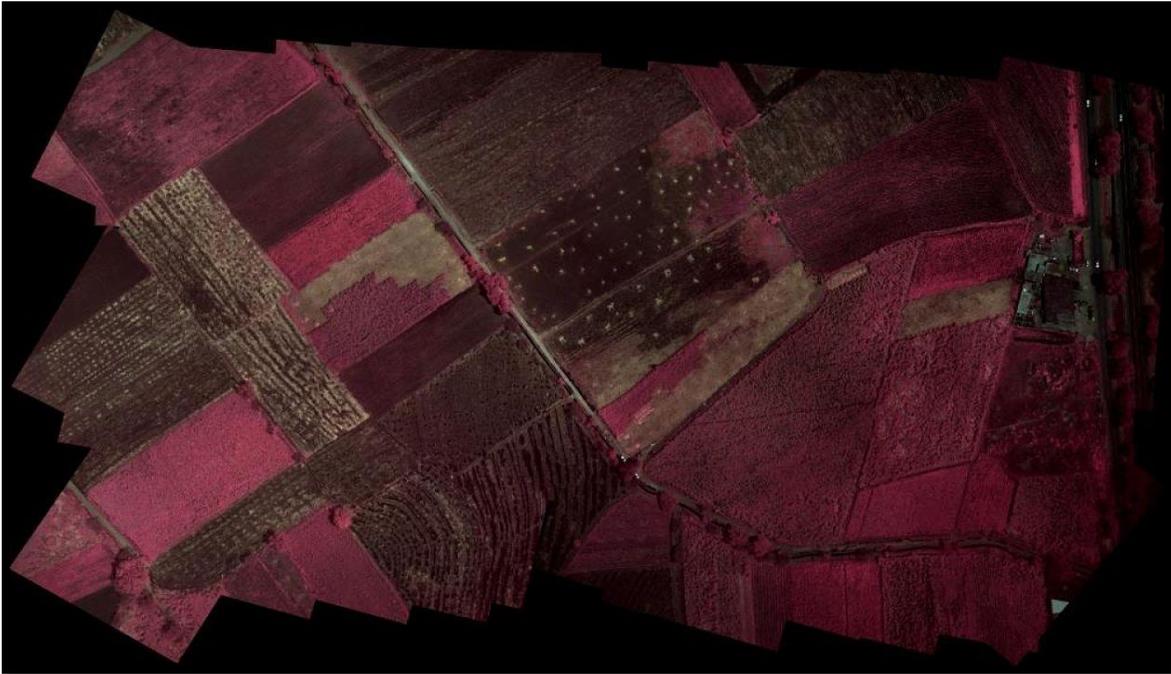


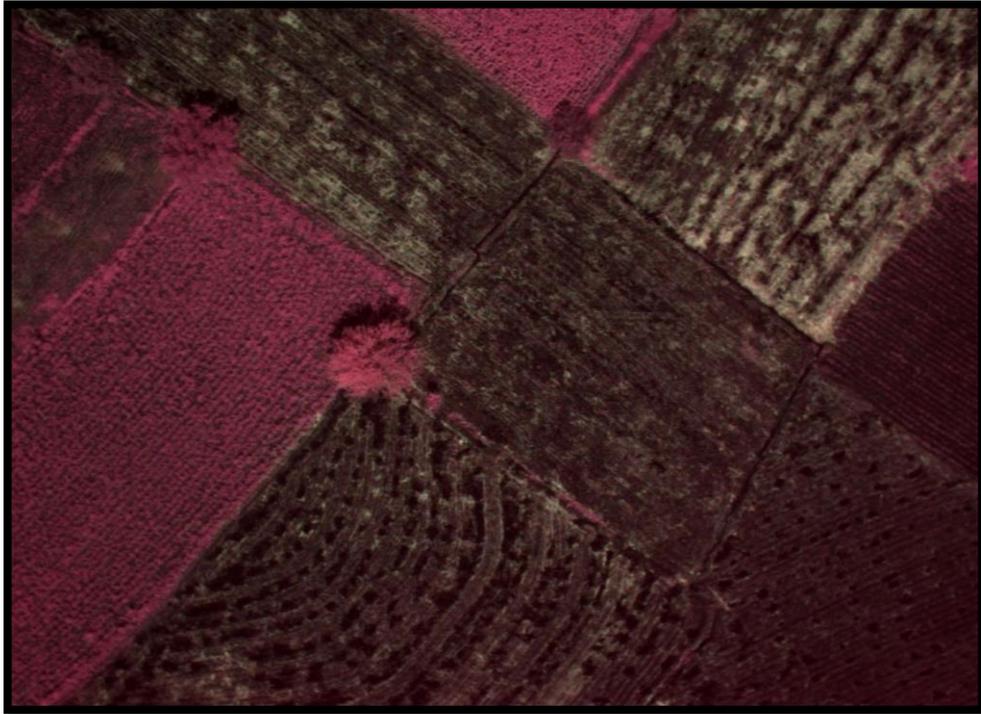
Pruebas de vuelo en zonas agrícolas

a) Puente de Ixtla, Morelos

Esta práctica de vuelo se realizó sobre una zona agrícola dedicada principalmente al cultivo de caña, se utilizó la cámara visual y la multispectral.







b) Pruebas de vuelo en Chapingo, México

En esta práctica de vuelo se utilizó la montura de dos ejes equipada de las cámaras visual y multiespectral.





8.2.2 Introducción

En agricultura se utiliza el vuelo de VANTs para capturar imágenes de los campos de cultivo. En la actualidad las imágenes de los vuelos son procesadas con ayuda de una gran gama de software haciendo posible la creación de aerofotomosaicos georeferenciados y modelos digitales en 3D.

Mediante el tratamiento de imágenes obtenidas por los VANTs, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) puede contar con las herramientas tecnológicas para obtener información de parcelas, cultivos, suelos, infraestructura hidroagrícola, etc. Es de especial interés del IMTA contar con un software que fortalezcan la ejecución de proyectos en las áreas de planeación, operación, administración y evaluación de las zonas de riego del país. Por lo anterior se llevó a cabo el curso sobre “Planeación y producción de aerofotomosaicos georeferenciados con vehículos aéreos no tripulados” celebrado en el centro de capacitación del IMTA, del 3 al 7 de agosto del 2015.

Se incluye una breve descripción del curso, información sobre software para el procesamiento de imágenes, así como los trabajos desarrollados por los participantes.

8.2.3 Objetivo

Capacitar a un grupo de 10 especialistas de la Coordinación de Riego y Drenaje del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en la elaboración de aerofotomosaicos georreferenciados a partir de imágenes adquiridas con vehículos aéreos no tripulados.

8.2.4 Programa del curso

El programa de capacitación de Terrasat es el siguiente:

| Día 1 | |
|-------|---|
| HORA | ACTIVIDAD |
| 09:00 | Introducción y objetivos del curso |
| 10:00 | Plan de vuelo |
| 14:00 | Comida |
| 16:00 | Localización de Zona de Estudio |
| 18:00 | Fin de jornada |
| Día 2 | |
| 09:00 | Historia de los UAV, clasificación y costos |
| 11:00 | Conceptos básicos de Cartografía, fotogrametría SIG&GPS |
| 14:00 | Comida |
| 16:00 | Conceptos Básicos de Fotografía |
| 18:00 | Fin de jornada |
| Día 3 | |
| 09:00 | Introducción a PIX4D |
| 12:00 | Levantamiento de puntos de control con GPS |
| 14:00 | Comida |
| 16:00 | Plan de vuelo Fotogramétrico |
| 18:00 | Fin de jornada |
| Día 4 | |
| 09:00 | Georreferencia de imágenes aéreas en puntos de control |
| 11:00 | Levantamiento en campo de Imágenes y video con drone |
| 14:00 | Comida |
| 16:00 | Geo procesamiento de datos levantados en campo |
| 18:00 | Fin de jornada |
| Día 5 | |
| 09:00 | Geo procesamiento de datos levantados en campo (continuación) |
| 12:00 | Revisión de datos |
| 14:00 | Comida |
| 16:00 | Proyecto final grupal |
| 18:00 | Fin de jornada |

Se contemplaron 30 horas teóricas y 10 horas prácticas.

8.2.5 Desarrollo de los trabajos

Esta sección se divide en dos partes, preparativos preliminares y ejecución del curso.

8.2.6 Preparativos preliminares

Como trabajos preliminares a la ejecución del curso, se realizaron las siguientes acciones:

- a) Se recibió por parte del responsable del curso (personal IMTA) el listado de participantes.
- b) Para cada participante, se generó una licencia de uso competo del software Pix4D. Esta licencia dura activada 10 días. Después de este tiempo, el usuario podrá visualizar su proyecto, pero no podrá exportar sus resultados (modo licencia normal).
- c) Se envió al responsable del curso el listado de las licencias generadas y el nombre del participante asociado.

El lugar para la ejecución del curso, se definió en conjunto con el personal del IMTA la ubicación para la ejecución del curso, el cual fue el centro de capacitación del instituto, a cargo del área de desarrollo profesional.

Ejecución del curso

El curso inició el día 3 de agosto a las 9:30 horas. En la introducción del curso los participantes se presentaron, proporcionando su profesión, área de trabajo experiencia en cartografía y su experiencia con VANTs. En el siguiente tema se vieron los elementos para caracterizar la zona de estudio, como la obtención de la carta de INEGI para obtener información topográfica, del clima, la vegetación y las curvas de elevación. Se dio una presentación sobre el uso del GPS. La siguiente presentación mostró las principales características de los equipos fotográficos para la adquisición de imágenes. En el siguiente tema se hizo una revisión del software requerido para la elaboración de aerofotomosaicos y los modelos de elevación digital. Entre los programas que se revisaron las principales características se encuentran Pix4Dmapper, Adobe Lightroom, Global Mapper, Microsoft ICE, Trimble planning, Agisoft Photoscan, Google Earth Pro, Google Sketchup, Mission Planning, Ground Station. En los restantes tres días, el curso se centró en el uso del Pix4D y la ejecución de prácticas de vuelo para la toma de las fotografías de vuelo.

Los temas abarcados con el Pix4D fueron los siguientes: carga de imágenes, carga de puntos de referencia, definición de parámetros para la construcción de los modelos y mapas (memoria, núcleos, escala de la imagen, filtros, separación de curvas de nivel, archivos generados) y resultados (geotiffs, shape-files, pdfs, archivos dxf).

Las prácticas realizadas con mayor relevancia fueron las siguientes:

- a) En el día 2 se hizo la adquisición de imágenes de las aulas del centro de capacitación. Para esta actividad, fue utilizado un VANT y una cámara GoPro Hero, ambos proporcionados por nuestra empresa. Posteriormente, estas imágenes fueron utilizadas para construir un mosaico, el cual fue geo-referenciado usando Google-Earth, agregando los puntos de control correspondientes. Se explicó que esta misma técnica, se aplica usando métodos más exactos para la adquisición de coordenadas, como el uso de dispositivos RTK (Real-Time Kinematic).
- b) En el día 3 se hizo el modelado de la fuente usando fotografías adquiridas con una cámara que utiliza el IMTA para adquirir imágenes (sin dispositivo GPS que marque las coordenadas en la imagen). Se generó el modelo digital de elevación en 3D y se le dio un tratamiento para mejorarlo.
- c) A fin de comparar el resultado obtenido en la práctica anterior, el día 4 se realizó una nueva práctica usando la cámara Cannon S100 equipada con GPS. Se generó el modelo digital de elevación en 3D y se le proceso para mejorar el modelo. La siguiente figura muestra el resultado de esta segunda práctica sobre la fuente.



Figura 8.1 Imagen del Modelo digital de elevación en 3D de una fuente.

- d) En la última práctica, se utilizaron fotografías proporcionadas por el IMTA del dique 1 en localizado en Culiacán, Sinaloa. Se construyó el mosaico y el MDE. Esta información fue proporcionada a los equipos para la elaboración de su proyecto final.

8.2.7 Resultados

Como resultado del curso, se dejó a cada integrante el elaborar un estudio para la posible ejecución de una misión fotogramétrica. Los participantes del curso fueron organizados en equipos. El último día del curso, cada equipo hizo entrega de los siguientes elementos de un área de estudio:

- Polígono del área de estudio.
- Calculo del Mapex.
- Identificación de la zona de estudio y variables.
- Informe de hospitales, elementos básicos, topografía, clima y vegetación.

- Plan de vuelo.
- Modelo de elevación digital generado con el software Pix4Dmapper.

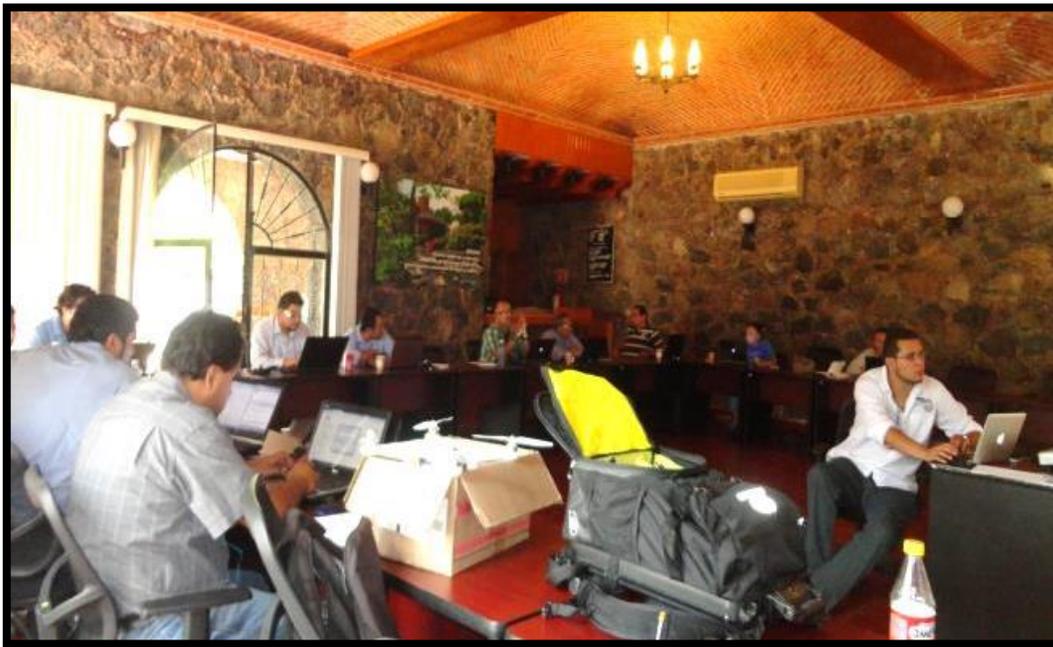
Estos elementos fueron plasmados en una presentación y mostrados al grupo y al instructor para recibir retroalimentación. En general, los resultados fueron satisfactorios.

Como entrega de material, Terrasat proporcionó presentaciones, modelos y manual del Pix4D en español. Este material fue compartido a los participantes del curso por medio de una carpeta en la nube en la aplicación Dropbox.

8.2.8 Memoria fotográfica

Generalidades y uso del software Pix4Dmapper





Reconocimiento del equipo para toma de imágenes



Prácticas de vuelo con VANT



Presentación del proyecto final del curso





8.3 Anexo 3. Curso Teórico-Práctico de pilotaje remoto e instrumentación para Vehículos Aéreos No Tripulados

8.3.1 Antecedentes

El monitoreo de variables de interés para la gestión de las zonas agrícolas del país, consume tiempo y recursos económicos, instrumentales y humanos, por la cantidad de datos que requieren, aunado a la dificultad para acceso a zonas agrícolas, por lo que frecuentemente el monitoreo de variables de interés agrícola es deficiente, disperso y requiere de un tratamiento previo para revisar su calidad y realizar una interpolación espacial y temporal. El uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) equipados con sensores multifuncionales pequeños complementados con sistemas de navegación autónoma es una alternativa viable de bajo costo para monitorear zonas agrícolas.

En esta vertiente, el IMTA adquirió un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT o DRON) tipo hélice de seis motores para desarrollar y validar aplicaciones agrícolas. Por lo que se tiene la necesidad de capacitarse en el desarrollo de habilidades indispensables para el mejor uso y manejo de estas herramientas. El dron tipo hélice está diseñado para solucionar problemas puntuales de alta resolución en un corto tiempo. El IMTA también está por adquirir un dron de mayor alcance tipo "ala", el cual nos permite tanto mayor alcance en distancia así como también en tiempo de vuelo. Un UAV presenta las características de ser un equipo desarrollado en USA, calibrado para su uso en México, se diseñó para ser de fácil despegue, portátil y durable; para su uso en mapeo.

Su operación puede ser manual, guiada o asistida, así como también completamente autónoma, su autonomía está dentro del rango de 40-45min con carga completa; dentro del equipo de mapeo este cuenta con una cámara óptica para fotografía plana y 3D, acondicionada con NDVI.

Los materiales de los cuales está constituido son: EPP (Etil Polipropileno) y Fibra de carbono.

La navegación puede ser en primera persona con ayuda de la cámara FPV, en primera persona con asistencia del mapa de posición, por vuelo en primera persona, asistencia de mapa de posición y navegación por computadora a un punto de interés y/o mapeo (Inspección de polígono a altura determinada)

El modo de despegue puede ser con el uso del equipo de cómputo, modo manual con radio control con la ayuda una base de lanzamiento terrestre.

El uso de estas herramientas móviles con fines de reconocimiento y generación de datos en diferentes formatos de video e imagen, involucra una serie de procesos a desarrollarse por etapas cronológicamente definidas como: planeación y ejecución del vuelo, procesamiento de datos y generación de resultados. Antes del vuelo es necesaria la planeación de las actividades, el trazo de ruta, la estimación de los tiempos de vuelo, la consulta de los eventos meteorológicos en la zona, etc. Durante el desarrollo de vuelo, el piloto de estos vehículos requiere tener el conocimiento práctico para el despegue, desarrollo de la misión y aterrizaje seguro, entre otras. Después del vuelo se requiere conocer el desensamble seguro del equipo, la descarga y tratamiento de la información, que a el postre permita genera productos robustos para la toma de decisiones en función del proyecto a desarrollar.

Este curso desarrollará capacidades en los asistentes para el pilotaje y la ejecución de misiones con drones, en términos tanto teóricos como prácticos. Los temas a tratar involucran la planeación del vuelo, legislación vigente, traslado del dron, instrumentación del vuelo, pilotaje y prácticas en campo. El conocimiento adquirido se utilizará para perfeccionar habilidades en el uso de vehículos aéreos no tripulados con fines de percepción remota aplicado a proyectos hidroagrícolas, desde el nivel de parcela hasta el monitoreo de la infraestructura, mediante el uso de dron tipo ala, de largo alcance, que idealmente significa superficies mayores a 100 ha en un solo vuelo.

8.3.2 Introducción

El IMTA desarrolla y genera aplicaciones potenciales de los Vehículos Aéreos No Tripulado (VANTs) de interés para los proyectos que realiza la Coordinación de Riego y Drenaje. Con la incursión de La Coordinación de Riego y Drenaje en la aplicación de Vehículos Aéreos No Tripulado para la adquisición de datos, imágenes y videos en el campo hidroagrícola, se tiene la necesidad de capacitarse en campo para desarrollar habilidades mínimas de pilotaje que son indispensables para el mejor uso de estos vehículos con seguridad para el personal del IMTA. Para lo cual, se requiere fortalecer las habilidades teórico-práctico para la instrumentación y pilotaje de drones tanto tipo "ALA" como multirrotores. El conocimiento adquirido

se utilizará para perfeccionar habilidades en el uso de vehículos aéreos no tripulados con fines de percepción remota aplicado a proyectos hidroagrícolas, desde el nivel de parcela hasta el monitoreo de la infraestructura, mediante el uso de dron tipo ala, de largo alcance, que idealmente significa superficies mayores a 100 ha en un solo vuelo.

La empresa John Holloway & Associates de Mexico SA de CV en el área del manejo de VANTs ha realizado proyectos en el estado de Chihuahua donde se sobrevoló un polígono con área de 573 Km² en un tiempo total de 12 días; en el estado de Jalisco se realizaron vuelos de inspección en el Lago de Chapala, en el estado de Nuevo León, en el municipio de Monterrey se realizó vuelos sobre el río Santa Catarina, todos estos proyectos fueron solicitados por CONAGUA, para el análisis de los cuerpos de agua.

Los resultados obtenidos se resumen fotografías las cuales fueron procesadas en el software Pix4D para la obtención de una ortofoto, de la cual se realizó un análisis de acuerdo a los términos de referidos.

Hasta la fecha la empresa mantiene el récord del área más grande sobrevolada con un VANT dentro del territorio mexicano, las innovaciones de las fuentes de energía, la constante modificación para el rendimiento de los VANT han permitido que los productos y servicios proporcionados por la empresa sean de una calidad superior.

8.3.3 Objetivo general

Obtener capacitación Teórico-Práctica para un grupo de 6 especialistas de la Coordinación de Riego y Drenaje en "Piloteo remoto e instrumentación para Vehículos Aéreos No Tripulados".

Descripción del servicio

Para el desarrollo de este servicio se realizó un programa el centro de capacitación del IMTA.

El programa del curso es el siguiente:

| Día 1 (teoría) | |
|---------------------------|---|
| HORA | ACTIVIDAD |
| 09:00 | Introducción y objetivos del curso |
| 10:00 | Plan de vuelo |
| 14:00 | Comida |
| 16:00 | Localización de Zona de Estudio |
| 18:00 | Fin de jornada |
| Día 2 (teoría) | |
| 09:00 | Instrumentación en UAV |
| 11:00 | Prueba de vuelo |
| 14:00 | Comida |
| 16:00 | Prueba de vuelo |
| 18:00 | Fin de jornada |
| Día 3 (práctica en campo) | |
| 09:00 | Tratamiento de datos con software especializado |
| 12:00 | Levantamiento de puntos de control con GPS |
| 14:00 | Comida |
| 16:00 | Plan de vuelo Fotogramétrico |
| 18:00 | Fin de jornada |
| Día 4 (práctica en campo) | |
| 09:00 | Práctica de vuelo con dron ala |
| 11:00 | Despegue y aterrizaje |
| 14:00 | Comida |
| 16:00 | Vuelo de largo alcance |
| 18:00 | Fin de jornada |
| Día 5 (práctica en campo) | |
| 09:00 | Vuelo de largo alcance |
| 12:00 | Revisión de datos |
| 14:00 | Comida |
| 16:00 | Proyecto final grupal |
| 18:00 | Fin de jornada |

Se contemplan 16 horas teóricas, 24 horas prácticas.

Ejecución del curso

El curso se presento por parte de la empresa John Holloway & Associates de Mexico S. A. de C. V. en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) dio inicio el día 25 de noviembre a las 9:00. En la introducción del curso los instructores

se presentaron, proporcionando su profesión, área de trabajo y experiencia en el uso de VANTs. Como introducción al curso se abarcaron las principales características del VANT y los equipos fotográficos para la adquisición de imágenes. Siguiendo con la capacitación se hizo una revisión del software Uthere Ground Control requerido para la elaboración de planes de vuelo. En los restantes días, el curso se centró en la ejecución de prácticas de vuelo para la toma de las fotografías aéreas.

Las prácticas realizadas con mayor relevancia fueron las siguientes:

- a) Creación de plan de vuelo con el software Uthere Ground Control, se presentó de forma general el manejo y edición de los cursos de vuelo, interpretación de los menús del software, instrucciones de conexión VANT-laptop, revisión y análisis del vuelo. Además en este apartado se realizaron planes de vuelo con el fin de abarcar un área rectangular correspondiente a una zona agrícola, por otra parte se realizó un plan de vuelo de obra línea.
- b) Prácticas de despegue, manejo y aterrizaje del VANT. Esta actividad se realizó a una altura controlada de 120 m, el principal objetivo fue que los participantes adquirieran habilidad en el uso de la radio controladora para la manipulación del VANT.
- c) Adquisición de imágenes de zona agrícola en Morelos. Para esta actividad, fue utilizado el VANT de ala fija y una cámara modificada para NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), ambos proporcionados por nuestra empresa.

8.3.4 Desarrollo de los trabajos

Los trabajos se desarrollaron en el orden que se menciona en el programa del curso, comenzando con un curso teórico general, el programa del curso teórico es como sigue:

- Iniciando con la identificación y uso de las partes del VANT.
- Instructivo de manejo del VANT.
- Identificación de partes del radio control su uso y manejo.
- Presentation de software (UThere Ground Control).

- Introducción al manejo del Software de la estación de tierra.
- Práctica de la creación de misiones y/o planes de vuelo.

El curso práctico general se realizó prosiguiendo las instrucciones mencionadas en la teoría:

- Prevuelo y calibración del VANT.
- Procedimientos para el primero vuelo (Para mayor detalle consulte manuales RUBY previamente entregados).
- Procedimientos de conexión entre Estación de Tierra y VANT.
- Procedimiento de despegue y manejo de VANT mediante el radio control.
- Procedimiento de manejo de VANT mediante Ground Control (uso de laptop).
- Realización de misiones.
- Procedimientos de aterrizaje.

8.3.5 Resultados

Los resultados derivado del curso de capacitación de 6 especialistas en el uso y manejo de la instrumentación del UAV y software de control de tierra, UThere Ground Control, así como también el software de procesamiento y análisis de imágenes obtenidas mediante vuelos de UAV, fueron calificados en el curso práctico, en donde, como previamente se describió, se hicieron planeaciones de vuelos analizando los niveles del terreno para la realización de planes de vuelo con ayuda del software UThere Ground Control, donde se modificaron variables de altura, dirección de vuelo, distancia entre patrón de vuelo, con respecto al UAV se realizó el procedimiento de revuelo, localización del punto de despegue, despegue, la revisión de mandos del UAV en el aire, transición del radio control al centro de cómputo, activación de la misión del plan de vuelo, aproximaciones y aterrizaje.

Análisis de las fotografías obtenidas por el VANT, el procesamiento de tales imágenes se llevó a cabo de acuerdo al manual de uso proporcionado por el software UThere Ground Control. A continuación en las Figura 8.2 se muestra un

ortomosaicos digital de alta resolución de un área agrícola y zonas aledañas del estado de Morelos, el cual fue elaborado con el programa Microsoft ICE.

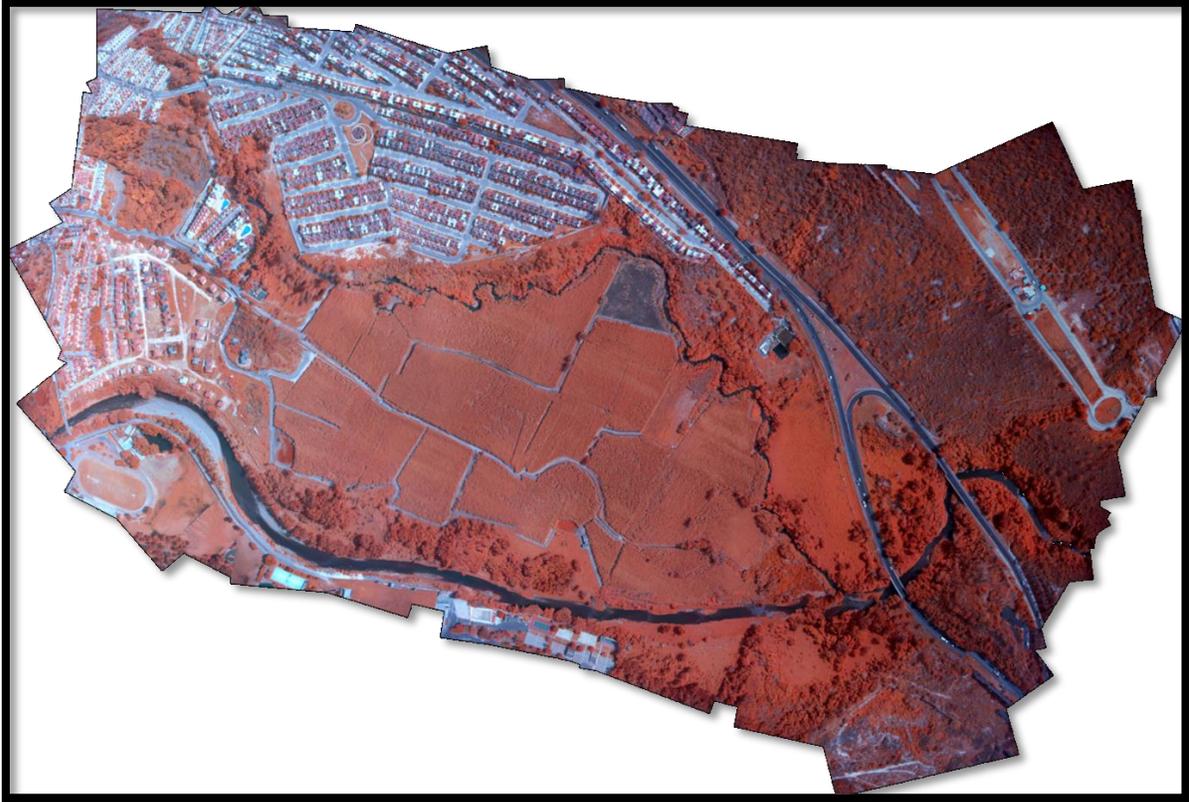


Figura 8.2 Ortomosaico digital de zona semiurbana de Xochitepec, Morelos.

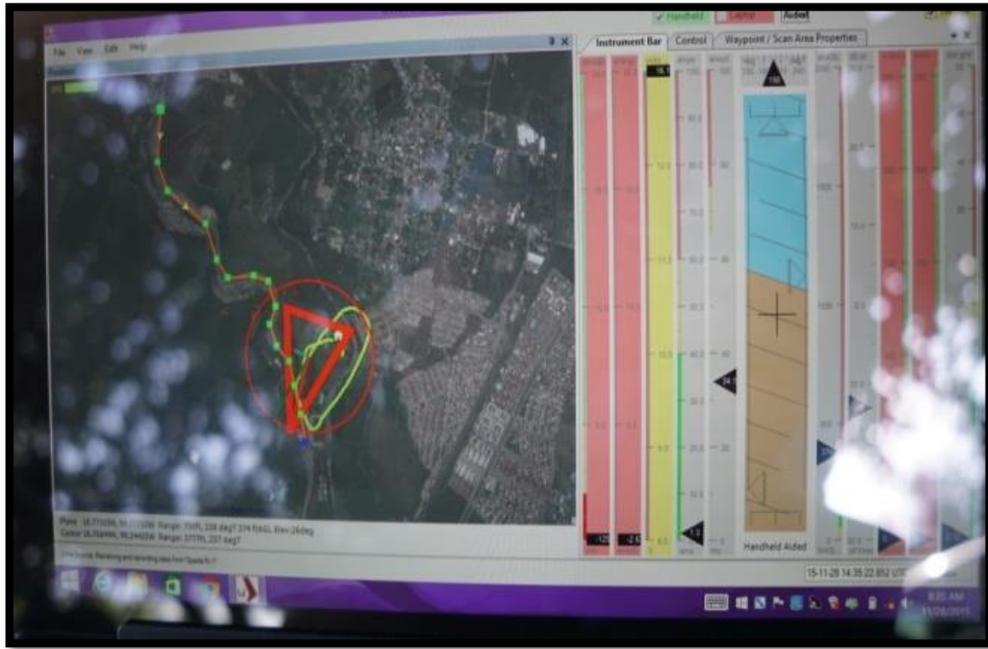
8.3.6 Memoria fotográfica

Introducción a la instrumentación de conexión de la estación tierra y armado del VANT





Introducción al software Uthre Ground Control, armando e instrumentación en el curso práctico y procesamiento de Prevuelo









Prácticas de manejo del VANT mediante radio control













Conclusión del Curso Teórico-Práctico de piloteo remoto e instrumentación para Vehículos Aéreos No Tripulados con la visita del director del IMTA a el área de prácticas de vuelo.





8.4 Anexo 4. Aplicaciones

8.4.1 Elaboración de planos topográficos

Los canales de riego son obras de ingeniería importantes, que deben ser cuidadosamente diseñadas para que el agua llegue al lugar indicado en la cantidad y tiempo requerido. Están estrechamente vinculados a las características del terreno y generalmente siguen aproximadamente las curvas de nivel de este, descendiendo suavemente hacia cotas más bajas (dándole una pendiente descendente, para que el agua fluya más rápidamente y se gaste menos líquido).

La construcción del conjunto de los canales de riego es una de las partes más significativas en el costo de la inversión inicial del sistema de riego, por lo tanto se requiere contar con un levantamiento topográfico de alta precisión y detalle que se puede obtener a partir de fotogrametría con fotografías obtenidas con cámaras instaladas en VANT es posible

El procedimiento para la generación de información topográfica para el diseño y monitoreo de la infraestructura hidro-agrícola mediante fotogrametría utilizando fotografías aéreas tomadas por las cámaras que van instaladas en los VANT, debe seguir los siguientes pasos:

- i. **Planificación de vuelo.** La planificación de vuelo se hace en un software de control como DJI Ground Station o uThere Ground Control que permiten definir los parámetros de vuelo como altura, velocidad y la ruta o dirección de vuelo.
- ii. **Identificación de puntos de control en el terreno.** Para que las fotografías sean correctamente georreferenciadas, es preciso identificar varios puntos de control en el terreno cuya posición será conocida en sus tres posiciones X, Y, Z. a partir de un GPS (de preferencia con corrección diferencial). Es imprescindible elegir como puntos de referencia aquellos que sean claramente identificables en la fotografía, utilizando para ello cruces de caminos, puentes u otros elementos de clara identificación, en caso de no existir puntos de fácil identificación se colocarán dianas o cuadros (Figura 8.3).



Figura 8.3 Ubicación de dianas en los puntos de control.

iv. *Ejecución del vuelo.* Durante la ejecución del plan de vuelo se debe vigilar constantemente el desempeño de las baterías, la velocidad y altura de vuelo así como que se cumpla correctamente la ruta planificada

v. *Procesamiento y cálculo del modelo digital del terreno.* Para el procesamiento y cálculo del modelo digital del terreno se utiliza el software PIX4D el cual en base a comparaciones múltiples entre las fotografías obtenidas por las cámaras obtiene el mosaico y el modelo digital del terreno.

vi. *Cálculo de variables topográficas de la infraestructura agrícola.* El modelo digital del terreno (MDT) (Figura 8.4), puede ser exportado a formato TIFF en PIX4D para usarse en cualquier otro software para el cálculo de parámetros lineales o volumétricos como Autocad, ArcGIS, etc.





Figura 8.4 Mosaico y Modelo digital del terreno de un canal de riego obtenido mediante el uso de cámaras instaladas en un VANT.

8.4.2 Diagnóstico y monitoreo de la infraestructura hidroagrícola

Para utilizar de manera más eficiente el recurso agua, desde la red de conducción y distribución hasta la parcela, es imprescindible que la infraestructura concesionada en los distritos de riego este en buenas condiciones por lo que se requiere realizar actividades de supervisión periódica de los canales, drenes, pozos, presas y compuertas, estas actividades pueden ser cubiertas de manera óptima con el uso de cámaras fotográficas instaladas en un VANT.



Figura 8.5 Supervisión de infraestructura hidroagrícola con el uso de VANT.

La infraestructura hidroagrícola son obras de ingeniería civil para almacenar, derivar, conducir, medir, dividir o entregar el agua a usuarios de una zona de riego. Algunos ejemplos son presas de almacenamiento o derivación, canales y diques. Como toda obra civil, esta infraestructura debe ser monitoreada o supervisada para

conocer su estado y programar su mantenimiento, conservación, rehabilitación o modernización, o bien, como parte de las acciones relacionadas con la supervisión después de la ocurrencia de desastres naturales (Liu et al., 2014). Hoy en día, la fotogrametría, la percepción remota y los VANTs facilitan este proceso, al tener las siguientes ventajas:

- Se obtienen fotografías y video en alta resolución de la obra en una o pocas misiones de vuelo (Figura 8.5), a un bajo costo. Esta tarea demandaba el uso de vehículos tripulados o brigadas de supervisión, controlados de forma manual y directa por un operador humano, con un gran consumo de tiempo y recursos.
- No expone la vida del operador, ya que el recorrido se programa de forma remota y se asiste por medio de un sistema de supervisión computarizado.
- Entre el equipo fotogramétrico que puede ser colocado en el VANT se encuentran las cámaras térmicas y termográficas. Éstas pueden ser utilizadas en la detección de corrosión, fugas y motores con problemas de calentamiento.

Las imágenes aéreas y la percepción remota se han utilizado en el pasado para monitorear la infraestructura, como se reporta en (Huang, Fipps, Maas & Fletcher, 2009), donde se emplearon combinaciones de imágenes visibles, de infrarrojo cercano y térmicas para detectar fugas en 439 sitios en canales de 11 distritos de riego de Texas, EUA. Las imágenes fueron tomadas con una avioneta, a una altura de 914 metros, con una resolución de 0.64 metros por pixel para las imágenes en infrarrojo y de 2.07 por pixel para las imágenes térmicas. De los sitios monitoreados, se detectaron 140 sitios con fugas. Por otro lado, Agapiou et al. (2014) reporta el uso de un octocóptero equipado con una cámara RGB y otra multiespectral para detectar fugas en tubería subterránea usando fotografías de alta resolución tomadas a baja altitud. Las imágenes se utilizaron para detectar cambios en las propiedades del suelo, cambios de temperatura y el crecimiento anómalo de vegetación a lo largo de la ruta de la tubería. Típicamente, ortomosaicos y los modelos de elevación digital construidos a partir de fotografías tomadas desde VANTs son de utilidad para el monitoreo de la infraestructura hidroagrícola (Figura 8.6).

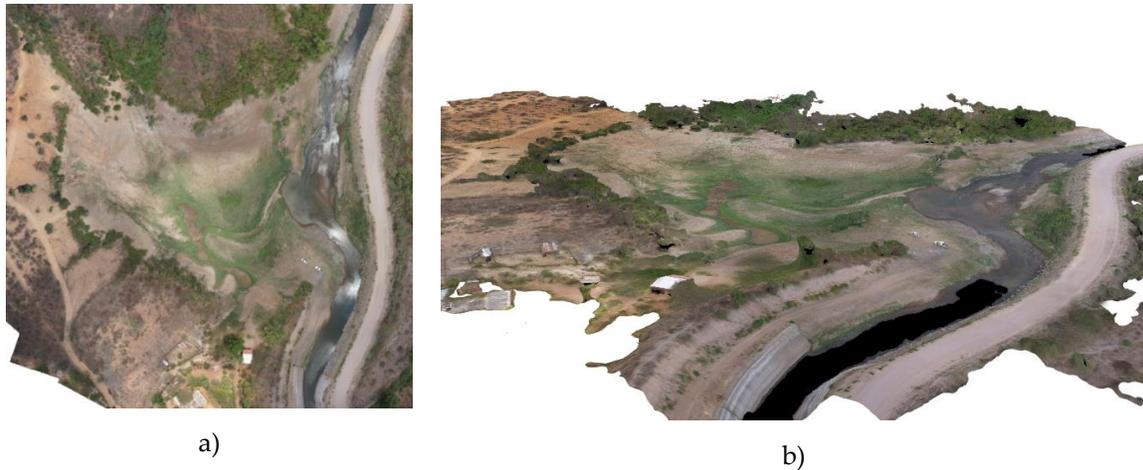


Figura 8.6 Ortomosaico (a) y modelo de elevación digital (b) del dique 1 del Distrito de Riego 010, Culiacán, Sinaloa, México.

8.4.3 Caracterización parcelaria: obtención precisa de parámetros de suelo con fines de diseño de riego.

Introducción

En el diseño del riego por gravedad, como principal sistema de aplicación de riego en México, es imperativo el uso de tecnologías y equipos que faciliten realizar esta tarea de manera expedita, con la menor mano de obra y con el menor riego de errores. Tradicionalmente, la forma de diseñar se basa a prueba y error, a través de una actividad que se vuelve cíclica; se diseña el riego, se evalúan los parámetros y con estos se vuelve a diseñar. En función de las características del suelo y longitud de los surcos, esta actividad puede durar hasta días.

Cuando se cuenta con la información suficiente de campo es posible alimentar programas informáticos que permite estimar el tiempo de riego, lamina y longitud de surcos adecuado, una vez conocidos los parámetros hidráulicos de la parcela. Dichos parámetros se obtienen a través de pruebas de campo que demandan tiempo y mano de obra.

Una de las tecnologías que se ha extendido al campo hidroagrícola es el uso de vehículos aéreos no tripulados. En el ámbito agrícola, se está adaptando en actividades de reconocimiento y corrección a nivel parcela, detección de zonas

erosionadas, cultivos siniestrados, etc. Pero sin duda que esta tecnología encuentra aplicación en las más diversas actividades.

En el diseño de riego por gravedad, se aplicó el uso de drones en el seguimiento del riego en las pruebas de campo correspondiente, con el objetivo de generar una metodología que permita su caracterización parcelarias, en particular su estimación de la curva avance recesión del riego usando imágenes fotográficas activadas desde una plataforma móvil, específicamente un dron.

En este documento se presentan las actividades que se están realizando con el fin de generar dicha metodología, y evaluar su utilidad para ser aplicable en las vastas regiones agrícolas.

Riego por gravedad

La mejor etapa fenológica del cultivo en donde puede ser evaluado los parámetros parcelarios es durante la aplicación del riego de asiento o los primeros riegos cuando la planta aun no cubre el suelo, y en consecuencia es visible el flujo del agua sobre el surco.

Es importante, tener en cuenta los parámetros que definen la eficiencia del riego, tales como la longitud y dirección del surcado, la pendiente, en función de la regadera y la represa, que será la fuente y/o inicio del riego, como se muestra en la figura 8.7.



Figura 8.7 Aplicación del primer riego parcelario.

Al ingresar el agua al surco, es importante conocer los tiempos, de inicio del riego y gradualmente conocer el avance de riego en una serie de puntos a lo largo de varios surcos. Es imperativo evaluar el avance del flujo. La prueba de riego permite la caracterización de los parámetros parcelarios que son de utilidad para simular el proceso y así estimar las mejores características del riego como gasto y longitud de surco, mediante sistemas computacionales que resuelven las ecuaciones que describen el movimiento del agua en el surco.

Con la caracterización de los parámetros parcelarios, se está en condiciones de validar el modelo y si este es adecuado, extrapolar la información a zonas con características físicas de las parcela similares, y no necesariamente hacer pruebas de riego en cada parcela, que además del costo económico, el costo en tiempo lo hace incoesteable. Uno de los problemas en la estimación del avance del agua en los surcos es su alta variabilidad como se muestra en la Figura 8.8.



Figura 8.8 Variabilidad en el avance del agua en los surcos.

Cuando el agua tiene avances erráticos e irregulares, es importante definir las causas. Algunas veces se trata de agrietamientos, que impiden la uniformidad, y consecuentemente no hay modelo que pueda describir este comportamiento. Es un reto medir en campo los tiempos de avance y recesión del agua en varias decenas de surcos de una parcela. Dicha información define las curvas de avance y recesión que son el insumo básico para diseñar la aplicación parcelaria del riego por surcos.

Representación esquemática de la fase de avance

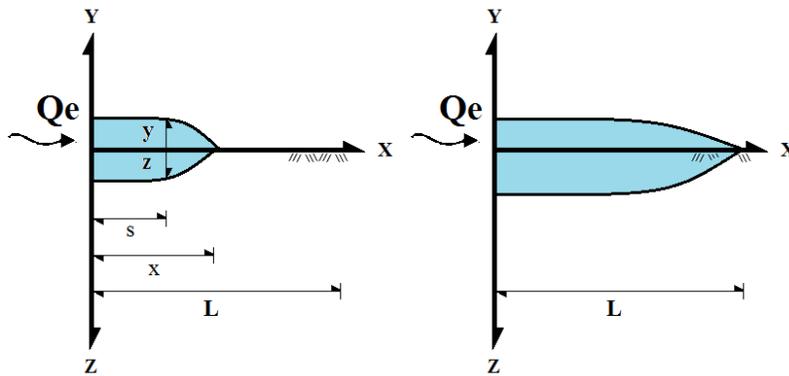


Figura 8.9 Avance del agua en dos tiempos.

El modelo que describe este flujo, está representado por la ecuación 1 que para fines prácticos puede ser reducida como

$$Q_m T = \int_0^s A_{\bar{h}}(x, T) dx + \int_0^s A_i(x, T) dx \dots$$

$$Q_u T = \bar{h} S(T) + \int_0^s I(T_o) dx$$

$$I = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{I}{\lambda} \right)$$

$$\lambda = (h + h_f)(\theta_s - \theta_0)$$

Para resolver estas ecuaciones, se considera el tirante h y la función de infiltración I (T_o) conocidos. Luego entonces, lo que se pretende es tener la parametrización de acuerdo al tipo de suelo, que inicialmente puede ser usado de manera teórica (cuadro 8.1).

Cuadro 8.1 Parámetros hidráulicos de suelos agrícola tipo.

| Textura del suelo | Parámetros | | | |
|------------------------|--|--|---------|-----------|
| | θ_o (cm ³ /cm ³) | θ_s (cm ³ /cm ³) | hf (cm) | Ks (cm/h) |
| Arena | 0.07 | 0.41 | 2 | 15 |
| Arena franca | 0.09 | 0.42 | 4 | 10 |
| Franco arenosa | 0.16 | 0.46 | 12 | 2.9 |
| Franco | 0.20 | 0.46 | 25 | 1.5 |
| Franco limoso | 0.17 | 0.55 | 30 | 1.0 |
| Limo | 0.14 | 0.55 | 35 | 0.8 |
| Franco arcillo arenoso | 0.18 | 0.42 | 12 | 2.0 |
| Franco arcilloso | 0.25 | 0.48 | 38 | 0.4 |
| Franco arcillo limoso | 0.26 | 0.49 | 60 | 0.15 |
| Arcilla arenosa | 0.25 | 0.42 | 25 | 0.5 |
| Arcilla limosa | 0.32 | 0.48 | 100 | 0.05 |
| Arcilla | 0.36 | 0.49 | 100 | 0.05 |



Figura 8.10 Representación del inicio de la fase de recesión.

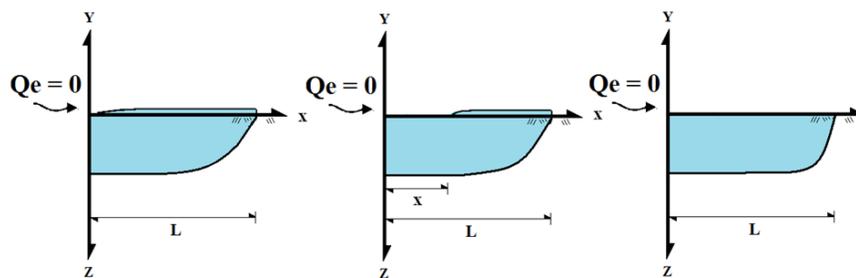




Figura 8.11 Finalización de la prueba de riego.

Conceptos sobre riego parcelario

La uniformidad del riego es un tema crítico en cualquier sistema de riego, por ejemplo en riego localizado, se estima una alta uniformidad, pero esta está supeditada al correcto diseño del sistema, espaciamiento y la adecuada instalación.

La figura 8.12 muestra un mosaico de fotos tomadas con el dron del IMTA y procesadas para determinar la eficiencia del riego, atendiendo el bulbo de mojado



Figura 8.12 Variabilidad en la aplicación del riego por goteo.

En riego por gravedad se realizaron los vuelos con el fin de medir en campo las curvas de avance-recesión mediante el riego por gravedad, la metodología usada puede ser resumida como sigue:

1. Definir los puntos de control en la parcela
2. Colocar marcas equidistantes de referencia del avance del agua en varios surcos, por ejemplo cada 20 metros
3. Medir el gasto de entrada a los surcos utilizando sifones u otro dispositivo de estimación del gasto
4. Realizar el vuelo con el dron, tomando en cuenta tiempo y posición de cada imagen.
5. Restitución de las imágenes para extracción de datos y metadatos
6. Estimación de los parámetros y cálculo de la curva recesión

Las imágenes siguientes que se muestra fueron tomadas atendiendo a la metodología indicada.



Figura 8.13 Imágenes captadas con la cámara en los drones.

Curva de avance recesión

Con los antecedentes expuestos sobre la importancia y procedimiento para la estimación de parámetros físicos con fines de riego, en esta primera aproximación se llevaron a cabo la planeación y ejecución de los vuelos con el fin de establecer el tiempo de avance y recesión del flujo del agua mediante las fotografías aéreas, y poder elaborar las curvas como la que se muestra en la figura 8.14.

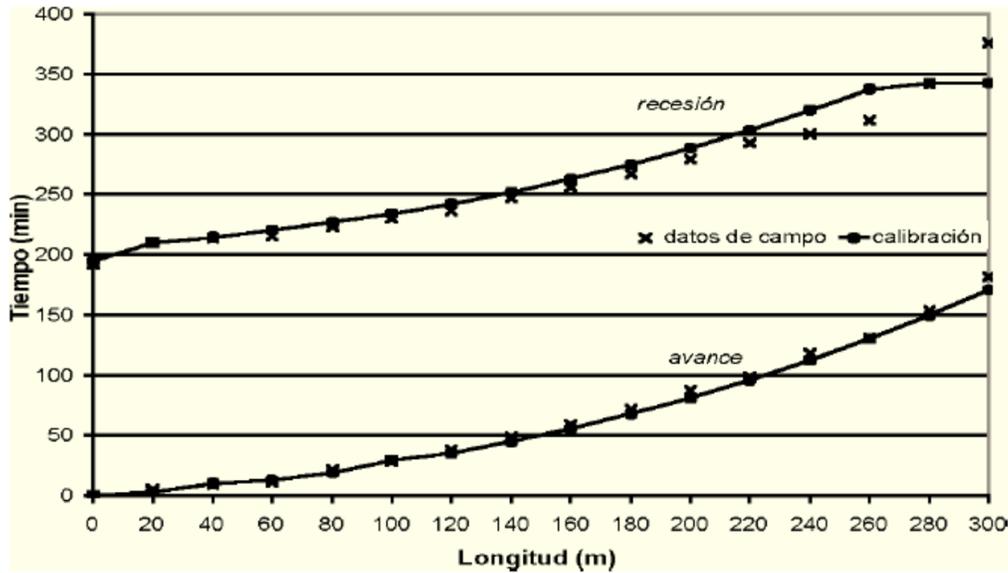


Figura 8.14 Representación esquemática del avance y recesión en una parcela tipo.

La fotografía aérea, permite complementar la serie de parámetros para llevar a cabo el cálculo de las ecuaciones de infiltración mostradas en el punto 2 y con ello el diseño del riego. La figura 8.15, muestra las características de las imágenes que serán utilizadas para la estimación de los parámetros que relacionan tiempo y distancia para la generación de las mencionadas curvas.



Figura 8.15 Parcelas seleccionadas para la ejecución del vuelo.

Una vez realizado el vuelo, la serie de imágenes puede ser “procesada” con el fin de obtener un panorama general al detalle deseado para obtener las curvas de avance-recesión con fines caracterización parcelaria para riego por gravedad. La figura 8.16

muestra la unión de las imágenes en la etapa inicial del riego; se puede apreciar la regadera que surte a los surcos, los sifones que suministran el agua al surco, el avance del agua en el surco y las marcas colocadas a cada 20 m, aquí se muestra el primer tramo



Figura 8.16 Mosaico representativo del riego por surco y regadera.

Las figuras 8.17 a y b son imágenes aisladas que muestra un mayor detalles del flujo y las cuadrícula base para la caracterización de la parcela



Figura 8.17 Avance del agua en el surco, con la marca a 40 m (a) y la marca de 0-20 m (b).

A continuación se esquematiza un Ejemplo de calibración y ajuste de los parámetros del suelo.

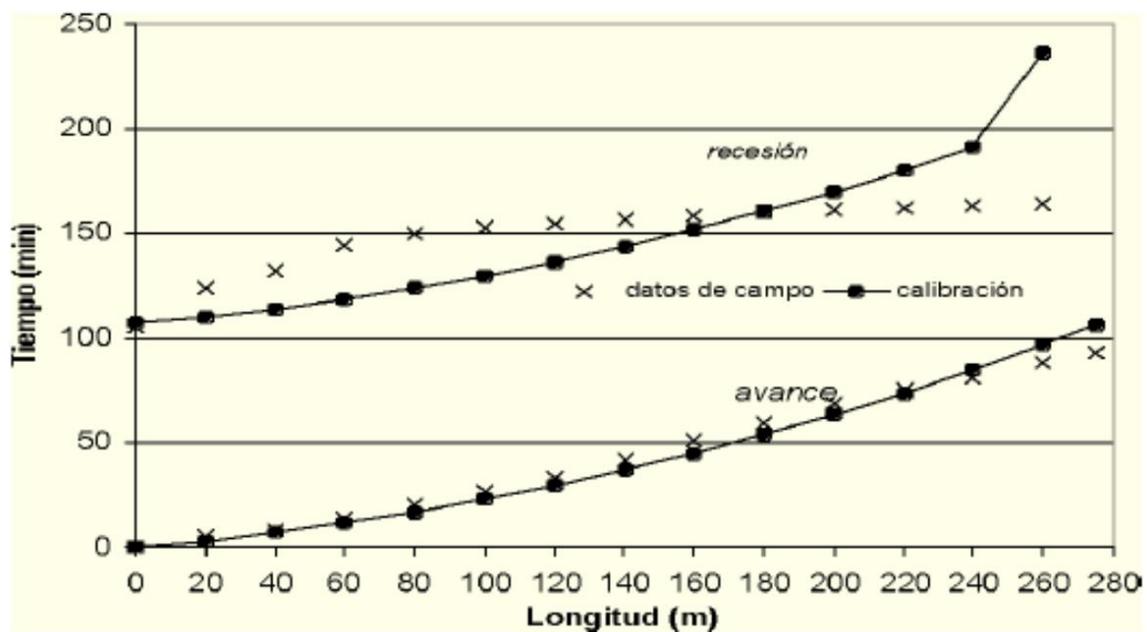
| Datos estimados del surco (l) lamina (Lr) y gasto unitario (Qu) | Parámetros físico estimados en función del suelo | Resultados: |
|---|--|---|
| <p>Longitud = 300 m</p> <p>Lr = 5.3 cm</p> <p>Qu = 2.55 l/s/m</p> | <p>$K_s = 0.44 \text{ cm/hr}$</p> <p>$h_f = 73 \text{ cm}$</p> <p>$n = 0.038 \text{ s m}^{-1/3}$</p> <p>$\Theta_o = 0.275 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$</p> <p>$\Theta_{cc} = 0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$</p> <p>$\Theta_s = 0.44 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$</p> <p>$S = 0.33 \%$</p> | <p>$K_s = 0.43 \text{ cm/hr}$</p> <p>$h_f = 75 \text{ cm}$</p> <p>$n = 0.039 \text{ s m}^{-1/3}$</p> |

De la prueba de riego se obtuvieron los siguientes datos de campo.

Datos de avance y de recesión

| Longitud (m) | Avance (min.) | Recesión (min.) |
|-----------------|------------------|--------------------|
| 0 | 0 | 105 |
| 20 | 5 | 124 |
| 40 | 7 | 133 |
| 60 | 13 | 144 |
| 80 | 20 | 150 |
| 100 | 27 | 153 |
| 120 | 34 | 155 |
| 140 | 45 | 156 |
| 160 | 51 | 158 |
| 180 | 59 | 160 |
| 200 | 69 | 162 |
| 220 | 76 | 163 |
| 240 | 82 | 164 |
| 260 | 89 | 165 |
| 280 | 94 | 165 |

Con lo cual se obtiene el ajuste de la curva que se muestra en la siguiente figura.



Bibliografía

Carlos Fuentes Ruiz y Luis Rendón Pimentel. 2015. Riego por gravedad. Universidad Autónoma de Querétaro. Qro. 357 p

Pascual, B. 1993. El riego; principios y prácticas. Universidad Politécnica de Valencia. 401 p

Rendón, I. (1993). Riego por melgas capítulo del libro II CURSO INTERNACIONAL DE SISTEMAS DE RIEGO. Chapingo, México.

Walker, W.R. and Skogerboe, G.V. 1987. Surface irrigation. Theory and practice. Prentice-Hall.368 p.

<http://msutoday.msu.edu/news/2013/msu-lands-first-drone/> (8 enero 2015)

8.5 Anexo 5. Artículo enviado a la revista *Tecnología y Ciencias del Agua*

8.5.1 Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola

APPLICATIONS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE HYDROAGRICULTURAL ENGINEERING

Ojeda-Bustamante Waldo, González-Sánchez Alberto, Mauricio-Pérez Azucelli M., Flores-Velázquez Jorge

Resumen

El monitoreo remoto de variables agrícolas sigue siendo un reto actual ante los altos costos que representa la adquisición manual de datos con alta frecuencia. A partir de la década de los 70s, la puesta en órbita de satélites ha facilitado el monitoreo de la superficie terrestre, incorporando tecnología de sensores remotos para mejorar los métodos de análisis, procesamiento y despliegue de información espacial de variables de interés hidroagrícola. Sin embargo, ante la demanda de información detallada, los satélites tienen la limitante de suministrar información temporal discontinua e información espectral de baja resolución. Una alternativa emergente la proporcionan los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) o más comúnmente llamados drones. Ante el gran desarrollo que presentan los VANTs, es de utilidad conocer las principales características y componentes de los drones utilizados con fines agrícolas, los trabajos relacionados y su uso potencial en las diferentes áreas de aplicación hidroagrícola.

Palabras clave: Monitoreo agrícola, agricultura de precisión, sensores remotos, infraestructura de riego, dron.

Abstract

The remote monitoring of agricultural variables continues to be a challenge due to the high costs of collecting manually data at a high frequency. In the early 70s after placing in orbit satellites, monitoring earth's surface has been facilitated incorporating remote sensing technology and geomatics. This improved the methods of analysis, processing and display of spatial information of variables of hydro-agricultural interest. However, given the demand for detailed information, the satellites have the disadvantage of providing discontinuous temporal

information and low-resolution spectral information. Unmanned Aerial vehicles (UAVs), more commonly known as drones, provide an emerging alternative for remote monitoring. Due to the advances UAVs present for agricultural applications, it is useful to know their main characteristics and components, related works and their potential use in different hydro-agricultural applications.

Keywords: Agricultural monitoring, precision farming, remote sensing, irrigation infrastructure, drone.

Introducción

La puesta en órbita de satélites a inicios de los 70's despertó el interés de la comunidad científica por utilizar imágenes satelitales para estimar información agrícola de manera remota de diversas variables agrícolas que presentan alta variabilidad espacial y temporal y que demandan un monitoreo frecuente, tales como la estimación de superficie sembrada, la etapa fenológica de los cultivos establecidos y la predicción del rendimiento (Jackson, 1984). A partir de entonces, se ha facilitado el monitoreo de la superficie terrestre utilizando sensores remotos instalados en vehículos aéreos, mejorando los métodos de análisis, procesamiento y despliegue de variables de interés agrícola, como el índice de área foliar (Zhang & Kovacs, 2012). Sin embargo, ante la demanda de información detallada, los satélites tienen la limitante de suministrar información temporal discontinua y de baja resolución espacial (Mulla, 2013).

Una alternativa al uso de satélites para la adquisición de datos remotos son los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), conocidos coloquialmente como drones, o UAVs por sus siglas en inglés (Unmanned Aerial Vehicles). El desarrollo de estas aeronaves, junto con avances en la miniaturización de equipos, procesadores computacionales, fotografía, robótica, visión computarizada, y geomática han generado el desarrollo y surgimiento de estas herramientas para el procesamiento de grandes volúmenes de imágenes tomadas a baja altura (Colomina & Molina, 2014). El uso de VANTs facilita el monitoreo frecuente de parámetros de cultivos que actualmente anteriormente tenía restricciones a través de imágenes satelitales. Las aplicaciones de VANTs en la agricultura son diversas, y las necesidades actuales

perfilan esta herramienta con gran potencial para utilizarse en actividades de planeación, monitoreo y control de actividades agrícolas.

En la última década han sido publicados una gran cantidad de trabajos sobre el uso de VANTs en diversas áreas del saber humano. Sin embargo, se requiere una síntesis de las aplicaciones particulares para el área hidroagrícola. De esta forma, el presente trabajo presenta una revisión bibliográfica del uso de los drones en dicha área, con particular énfasis en el riego de precisión y el monitoreo de la infraestructura hidroagrícola, con la finalidad de evaluar y analizar las oportunidades que ofrece el uso de VANTs en la gestión de la agricultura de riego y sus actividades asociadas.

Definición, historia y ventajas de los VANT

En su forma más general, un VANT (o UAV, de Unmanned Aerial Vehicle) es un vehículo aéreo reusable controlado de forma remota, semi-autónomo, autónomo o con alguna combinación de estas capacidades (Eisenbeiss, 2009), que está acondicionado para colocar dispositivos auxiliares para actividades de monitoreo o control con la característica que pueden ser operados a distancia o pre-programados para diversos fines. Otros términos son drone, dron o RPA (Remotely Piloted Aircraft), este último indica que existe una persona que supervisa el vehículo de manera remota. El uso de los VANTs se remonta al siglo XIX con la utilización de globos aerostáticos no piloteados para bombardear ciudades enemigas en la guerra de Austria contra Venecia en 1849 (Ronconi, Batista y Merola, 2014). Los VANTs modernos comienzan su historia el 4 de mayo de 1924, cuando Étienne Oehmichen construyó un helicóptero de cuatro rotores con despegue vertical. Posteriormente, la tecnología de radio permitió el surgimiento de objetivos aéreos teledirigidos para prácticas de entrenamiento naval, los cuales fueron llamados drones, término que se empleó por primera vez en 1936 (Ronconi *et al.*, 2014). Aunque estos vehículos aéreos tuvieron en un principio fines militares, en la actualidad se utilizan en diversas aplicaciones civiles relacionada con actividades de vigilancia, control, fotogrametría, conservación del medio ambiente, agricultura y diagnóstico de desastres naturales.

Los VANTs presentan varias ventajas frente al uso de los vehículos tripulados o los satélites. Pueden acceder a zonas de difícil acceso geográfico a baja altura, obtener imágenes aéreas de alta resolución en tiempo real de bajo costo para estudios espacio-temporales. Al ser eléctricos en su mayoría, se les considera “amigables” con

el ambiente (eco-friendly). Entre sus desventajas, se tiene la dependencia de una estación de seguimiento en tierra, limitaciones de peso y volumen de carga, costo de equipamiento (los equipos auxiliares de bajo peso y volumen y alta precisión son caros) y limitación de tiempo vuelo por la capacidad de carga de vehículo que incluye baterías, estructura y equipo. Otra desventaja está relacionada con la regulación y normatividad de uso del espacio aéreo, la cual suele cambiar dependiendo del país en el cual se lleva a cabo la misión de vuelo. En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) ha actualizado la normatividad bajo la cual puede operarse un VANT (SCT, 2015) e indica que sólo pueden ser operados durante el día, en áreas que no estén clasificadas como prohibidas, restringidas o peligrosas.

Componentes y clasificación

En la terminología, se utiliza el concepto de Sistema de Aviación No Tripulado (SANT) para incluir además del vehículo aéreo VANT, una estación de control a tierra así como los dispositivos para despegue y aterrizaje. Así, un SANT consta de los siguientes elementos principales (Chao y Chen, 2012):

1. *Vehículo aéreo* que consta de: *i) Autopiloto*. Sistema micro-electromecánico usado para guiar al VANT sin asistencia de un operador humano, consiste de un procesador central (hardware) y un software de navegación GPS, capaz de realizar el despegue y el aterrizaje de forma autónoma. *ii) Fuselaje*. Estructura del VANT donde se montan los dispositivos externos. También soporta el empalme de estructuras de carga complementarias, como monturas móviles para cámaras y equipos auxiliares como aplicadores de agroquímicos. *iii) Carga útil*. Es la carga del VANT que pueden ser cámaras espectrales u otros dispositivos de emisión como LIDAR (Light Detection and Ranging), para funciones de inteligencia, reconocimiento o supervisión. *iv) Subsistema de comunicación*. La mayoría de los VANTs cuentan con más de un enlace inalámbrico para comunicación del VANT con estación terrestre. Por ejemplo, enlace RC para pilotaje seguro, WiFi para enlace para compartir datos, y enlace de datos para monitoreo terrestre.
2. *Estación de control terrestre*. Para monitoreo y ajuste de la misión en tiempo real. Tradicionalmente, incluye un monitor OSD (On Screen Display) que muestra datos telemétricos de la misión en curso, como el estado de la señal GPS, localización del VANT, nivel de carga de baterías y tiempo estimado de vuelo.

3. *Dispositivos de despegue y aterrizaje.* Varios VANTs, en particular los de ala, requieren de dispositivos especiales para despegue como lanzador hidráulico o redes para aterrizaje.

De acuerdo a Nonami *et al.* (2010), un VANT puede ser clasificado en alguno de los siguientes grupos:

De ala fija. Con forma típica de aeroplano, requiere un espacio para el despegue y aterrizaje, o catapulta para lanzamiento. Son resistentes y pueden volar a mayores velocidades de crucero que los de ala rotatoria.

De ala rotatoria. Altamente maniobrables, pueden aterrizar y despegar de forma vertical. Pueden ser de una o más hélices. En el caso de tener múltiples hélices estos multicopteros o multirotores son clasificados en función del número de motores, los cuales pueden girar sobre su eje y moverse en cualquier dirección. La Figura 8.18a presenta un ejemplo de este último tipo de VANT. Los multicopteros se agrupan dependiendo el número de hélices: tricóptero (tres hélices), de cruz o cuadricóptero (cuatro hélices), y de más hélices, como hexacóptero u octocóptero. Por su estabilidad de vuelo, tamaño y bajo precio, estos multicopteros son muy útiles para aplicaciones civiles (Figura 8.18 b).

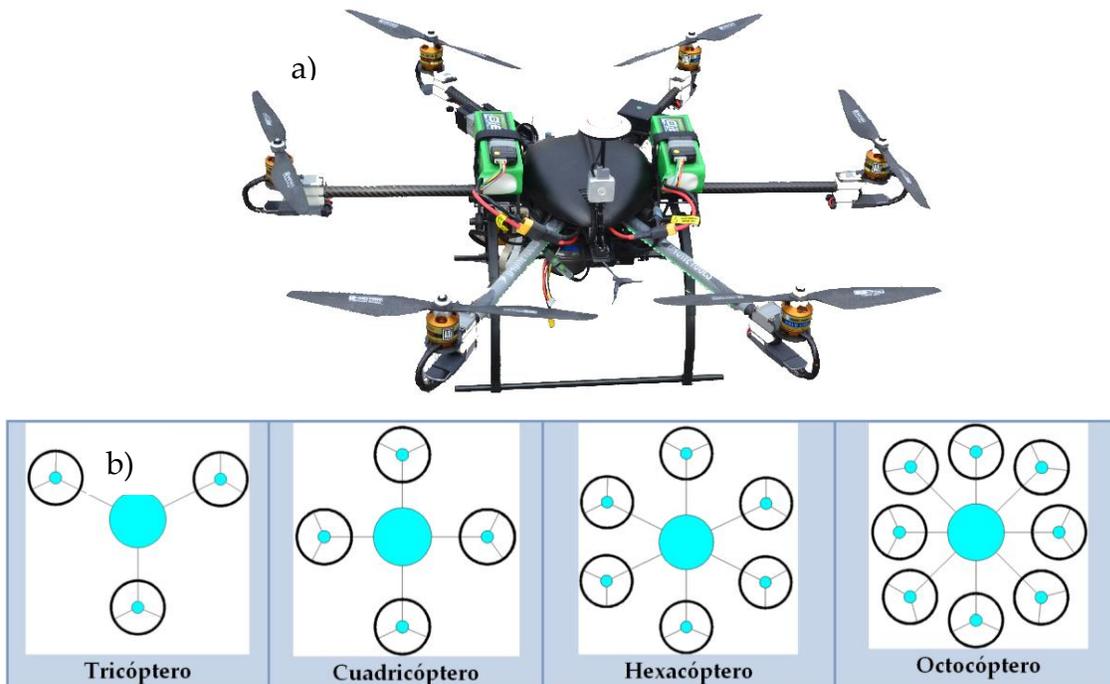


Figura 8.18 a) Hexacóptero fabricado por Dronetools, España, usado para generar las imágenes de este trabajo. b) Clasificación de VANTs tipo multicoptero.

Dirigibles o globos. Más ligeros que el aire, pueden tener vuelos de larga duración pero a baja velocidad. Son generalmente de forma alargada.

De aleteo. VANTs inspirados en los insectos, tienen pequeñas alas flexibles y/o adaptables.

De acuerdo con van Blyenburgh (2013) las diferencias generales por tipo de VANTs, con fines de monitoreo remoto, son las siguientes expresadas en peso, autonomía y carga por peso (Cuadro 8.2).

Cuadro 8.2 Características de los VANTs equipados con sensores remotos (Blyenburgh, 2013).

| Nombre | Peso (kg) | Autonomía (h) | Carga por peso (kg) |
|---------------------------------|-----------|---------------|---------------------|
| Ala fija | 0.5-4 | 0.5-2 | 1 |
| Multirotores (alas rotatorias) | 1.2-3 | 0.33-1.46 | 0.75-2.5 |
| Helicóptero (una ala rotatoria) | 90-100 | 1-2 | 28-30 |

Uso de VANTs en la agricultura

De acuerdo con Chao y Chen (2012), un sistema que integra a un VANT para aplicaciones de uso agrícola debe tener las siguientes características deseable:

- i. Bajo costo. La mayoría de las aplicaciones civiles de los VANTs son restringidas por su costo.
- ii. Monitoreo a gran y mediana escala. Muchas aplicaciones para agricultura requiere el monitoreo de decenas a miles de hectáreas.
- iii. Monitoreo frecuente. Varios procesos de interés agrícola requieren del monitoreo frecuente de variables, procesos o actividades que presentan alta variabilidad espacial y temporal, como la aplicación del riego, así como el desarrollo fenológico, estado fitosanitario y nutricional de los cultivos.
- iv. Alta resolución espacial. Algunas aplicaciones demandan la toma de imágenes y videos de alta resolución como la clasificación de la parcela, cultivo o suelo para detectar el grado de afectación o estrés a una variable ambiental, hídrica, edáfica o vegetal.

- v. Fácil manipulación. La mayoría de las aplicaciones agrícolas demandan procedimientos de adquisición, manejo, y análisis de datos, tan fáciles y simples como sea posible.
- vi. Algoritmos avanzados de monitoreo/actuación. Las misiones a realizar con los VANTs requieren de estrategias robustas, muchas veces complejas, que pueda ser programadas para monitoreo/actuación de manera simple, confiable, y rápida.

De manera similar a los satélites, la utilidad de los VANTs está estrechamente relacionado con los conceptos de la percepción remota, la teledetección (medición de la radiación reflejada, en lugar de la radiación transmitida o absorbida) y la teleobservación (mediciones sin contacto de la radiación reflejada o emitida por los cultivos). Tradicionalmente, las plataformas para realizar estas tareas incluyen satélites, aviones, tractores y sensores portátiles.

La teoría asociada a la teledetección de variables agrícolas es relativamente simple y conocida. La cantidad de radiación reflejada de las plantas es inversamente proporcional a la radiación absorbida por pigmentos de la planta y varía con la longitud de onda de la radiación incidente. Los pigmentos de la planta como la clorofila absorben la radiación en el espectro visible de 400 a 700 nm (Pinter et al., 2003). En el caso de los suelos desnudos la radiación se ve afectada principalmente por la humedad del suelo y el contenido de materia orgánica (Viscarra, Walvoort, McBratney, Janik & Skjemstad, 2006). Cada componente del suelo tiene una región espectral específica donde la reflectancia es más fuerte (Ben-Dor, 2010). El suelo desnudo y el dosel de los cultivos a menudo están presentes en una imagen de teleobservación y la mezcla de dos firmas espectrales a menudo confunde la interpretación de los datos de reflectancia (Figura 8.19), por lo que usualmente se recurre a la mezcla de dos o más regiones espectrales a través de índices espectrales, como el índice diferencial de vegetación normalizado como por sus siglas en inglés como NDVI (Deering, 1978), que resalta una característica de interés de la superficie terrestre y oculta otras.

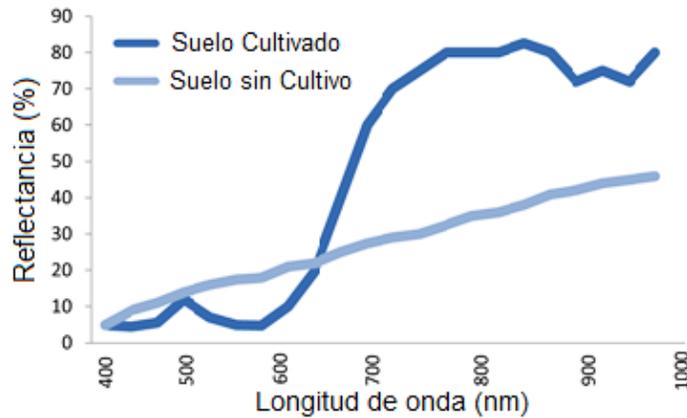


Figura 8.19 Firmas de reflectancia del suelo sin cultivado en comparación con las firmas de reflectancia de un suelo cultivado con papas, adaptado de Mulla (2013).

Algunas de las aplicaciones de la teledetección en la agricultura son: la predicción del rendimiento de los cultivos y biomasa (Shanahan et al., 2001; Yang, Everitt, Bradford & Escobar, 2000), el grado del estrés nutricional e hídrico de los cultivos (Clay, Kim, Chang, Clay & Dalsted, 2006; Moller et al., 2007) y los patrones espaciales de biomasa del cultivo (Yang et al., 2000).

En particular, las aplicaciones fotogramétricas en la agricultura se ha visto beneficiada con el uso de drones, la cual permite estimar las propiedades geométricas de los objetos y sus situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. Entre sus herramientas se tienen la generación de ortomosaicos y los modelos de elevación digital (MED). Un ortomosaico es una imagen compuesta georeferenciada que puede obtenerse de la aplicación de un algoritmo de triangulación basado en puntos clave binarios asociados a imágenes (Küng et al. 2011). Un modelo de elevación digital es una representación cartográfica digital de la elevación de la superficie de la tierra (Farah, Talaat & Farrag, 2008). Los MEDs son una de las herramientas de información espacial más importantes para aplicaciones geomorfológicas ya que permiten la extracción de atributos de interés de la superficie terrestre como pendiente, aspecto, altura, curvatura, y dirección de flujo.

El uso de VANTs facilita el monitoreo de las características de la superficie y su entorno, ya sea por medio de fotogrametría o por sensores remotos. Por esta razón, la mayor parte de las aplicaciones actuales de VANTs en la agricultura se relacionan con la agricultura de precisión. Otro aspecto relacionado con la agricultura que también se ha beneficiado con el uso de VANTs, es el monitoreo de la infraestructura

de riego. En las siguientes secciones se abordan con detalle estos dos temas, en particular con el uso potencial de los VANTs en aplicaciones hidroagrícolas.

VANTs y la agricultura de precisión

La agricultura de precisión es el conjunto de técnicas que permiten una mejor gestión de la producción agrícola, fundamentada en un manejo espacial diferenciado de una parcela a través de la aplicación local de insumos o recursos en función de la variabilidad espacial que afecta el rendimientos de los cultivos, para lo cual se requieren de sistemas para monitorear las variables de interés y de equipos que faciliten la aplicación de productos. De acuerdo a Leyva, Alves de Souza & Orlando (2001), la agricultura de precisión consiste en efectuar la aplicación correcta de insumos agrícolas, en el momento adecuado, en el lugar preciso, y con la dosis de óptima demandada por los cultivos mediante el uso de herramientas que facilitan la automatización de los procesos requeridos.

Existen tres fases para la aplicación de un VANT en la agricultura de precisión. i) El monitoreo, con detección y mapeo de las variables de interés en todo momento, donde los VANTs juegan un papel importante para adquisición de variables agrícolas de alta variabilidad espacial y temporal. ii) La toma de decisiones, donde los sistemas de información geográfica juegan un papel importante para generar mapas de aplicación de insumos o recursos. iii) La actuación, que es la ejecución de lo planeado en la fase anterior para la aplicación diferencial de insumos en tiempo y espacio.

En la agricultura de precisión podemos distinguir tres áreas en particular donde los drones tienen un potencial importante:

i. *Mapeo de propiedades/variables parcelarias.*

La estimación remota de la propiedades y variables físico/químicas/biológicas parcelarias son de gran utilidad para programar las actividades agrícolas, como por ejemplo: determinar zonas contaminadas o degradadas (Buccolieri, Buccolieri, Dell'Atti, Strisciullo & Gagliano 2010; Qiao et al., 2011); estudios de niveles críticos de nutrientes esenciales para cultivos y praderas (Chen et al., 2003); caracterización de suelos agrícolas o con potencial de uso agrícola (Bourennane, Nicoullaud, Couturier & King, 2004; Young et al., 2010); caracterización química o física de suelos

(Fidanza, 2007; Parvage, Ulén & Kirchmann, 2013) y la presencia de malas hierbas en una parcela (Torres-Sánchez et al. 2014).

ii. *Monitoreo hídrico de cultivos.*

El estrés hídrico de los cultivos es uno de los principales factores limitantes para la optimizar el proceso de fotosíntesis y la productividad primaria de los cultivo. La relación del déficit de presión de vapor estimado con la diferencia de temperatura del dosel vegetal y la temperatura del aire ha sido usado como índice de estrés hídrico de los cultivos, relacionándolo con la productividad y los requerimientos hídricos de los cultivos (Idso, 1982). Métodos tradicionales de detección del estrés hídrico son limitados cuando los efectos no visuales y es imprescindible conocer los efectos a nivel espectral del estrés hídrico. Bajo condiciones de estrés hídrico, las plantas pueden estar sobrepuestas a mayor energía radiante que la requerida para efectuar la fotosíntesis. En tales condiciones, la luz absorbida excede la demanda fotosintética y es disipada por las plantas como fluorescencia clorofílica y como calor para evitar daño oxidativo inducido. Usando índices, como el índice de reflectancia fotoquímica, obtenidos a través de imágenes hiperespectrales con apoyo de sensores remotos, los vehículos aéreos han sido usados para generar mapas de estrés hídrico y de la temperatura de los cultivos (Rossini, et al. 2013).

iii. *Riego de precisión.*

El riego de precisión permite el acoplamiento preciso, en volumen y oportunidad, de la aplicación del riego con la necesidades hídricas de los cultivos cuyo desfaseamiento impacta en la productividad de los cultivos, y pueden generar un riesgo ambiental (Ortega & F. 2001). El riego de precisión se presenta como la tecnología que fundamenta su desarrollo y aplicación en cuatro componentes principales: a) adquisición de datos en “tiempo real” del variables del suelo, cultivo y ambiente asociada al estrés hídrico de los cultivos, b) procesamiento de dicha información geoespacial para la toma de decisiones para la aplicación óptima del riego, c) desarrollo de tecnología que permita la aplicación del agua e insumos en el momento, cantidad y lugar “exacto” y d) desarrollo de herramientas de evaluación y monitoreo que permitan no solo la evaluación del desempeño de la aplicación del riego sino para proponer mejoras en cualquier componente del sistema de aplicación del riego (Smith, Baillie, McCarthy, Raine & Baillie, 2010).

Algunas aplicaciones de VANTs en la agricultura de precisión han sido reportadas por Xiang y Lei (2011) para conocer cambios en el desarrollo de un cultivo forrajero usando imágenes en pseudocolor en tres fechas que contrastan diferentes acciones de manejo con la variación del índice de verdor NDVI. Zarco, Diaz, Angileri y Loudjani (2014) usaron un VANT equipado con una cámara de bajo costo para estimar la altura de un follaje discontinuo (huerta) y fueron capaces de obtener imágenes tridimensionales en una zona agrícola de 158 ha, con las cuales se generaron orto-mosaicos y modelos digitales de superficie usando métodos automáticos de reconstrucción 3D. La estimación del coeficiente de cultivo (K_c) en función del porcentaje de cobertura (PGC) fue reportado por Fernández-Pacheco et al. (2014). Eisenbeiss (2009) utilizó un VANT para evaluar la producción de maíz modificado genéticamente usando un modelo MED y ortomosaicos de alta resolución. Moussa, Degré, Debouche y Lisein (2014) recolectaron datos topográficos de alta resolución en una cuenca pequeña de 12 hectáreas con el fin de comparar la precisión de la fotogrametría lograda a partir de imágenes adquiridas por VANTs contra la técnica de escaneo láser terrestre (Terrestrial Laser Scanning, TLS). En este último trabajo, los autores señalan que los VANTs son una herramienta prometedora para la adquisición remota de datos por su flexibilidad y bajo costo pero con ajustes aún pendientes para eliminar distorsiones no lineales generadas durante la etapa del procesamiento fotogramétrico.

VANTs y el monitoreo de la infraestructura hidroagrícola

La infraestructura hidroagrícola son obras de ingeniería civil para almacenar, derivar, conducir, medir, dividir o entregar el agua a usuarios de una zona de riego. Algunos ejemplos son presas de almacenamiento o derivación, canales y diques. Como toda obra civil, esta infraestructura debe ser monitoreada o supervisada para conocer su estado y programar su mantenimiento, conservación, rehabilitación o modernización, o bien, como parte de las acciones relacionadas con la supervisión después de la ocurrencia de desastres naturales (Liu et al., 2014). Hoy en día, la fotogrametría, la percepción remota y los VANTs facilitan este proceso, al tener las siguientes ventajas:

- a) Se obtienen fotografías y video en alta resolución de la obra en una o pocas misiones de vuelo, a un bajo costo. Esta tarea demandaba el uso de vehículos

tripulados o brigadas de supervisión, controlados de forma manual y directa por un operador humano, con un gran consumo de tiempo y recursos.

- b) No expone la vida del operador, ya que el recorrido se programa de forma remota y se asiste por medio de un sistema de supervisión computarizado.
- c) Entre el equipo fotogramétrico que puede ser colocado en el VANT se encuentran las cámaras térmicas y termográficas. Éstas pueden ser utilizadas en la detección de corrosión, fugas y motores con problemas de calentamiento.

Las imágenes aéreas y la percepción remota se han utilizado en el pasado para monitorear la infraestructura, como se reporta en (Huang, Fipps, Maas & Fletcher, 2009), donde se emplearon combinaciones de imágenes visibles, de infrarrojo cercano y térmicas para detectar fugas en 439 sitios en canales de 11 distritos de riego de Texas, EUA. Las imágenes fueron tomadas con una avioneta, a una altura de 914 metros, con una resolución de 0.64 metros por pixel para las imágenes en infrarrojo y de 2.07 por pixel para las imágenes térmicas. De los sitios monitoreados, se detectaron 140 sitios con fugas. Por otro lado, Agapiou et al. (2014) reporta el uso de un octocóptero equipado con una cámara RGB y otra multiespectral para detectar fugas en tubería subterránea usando fotografías de alta resolución tomadas a baja altitud. Las imágenes se utilizaron para detectar cambios en las propiedades del suelo, cambios de temperatura y el crecimiento anómalo de vegetación a lo largo de la ruta de la tubería. Típicamente, ortomosaicos y los modelos de elevación digital construidos a partir de fotografías tomadas desde VANTs son de utilidad para el monitoreo de la infraestructura hidroagrícola (Figura 8.20).

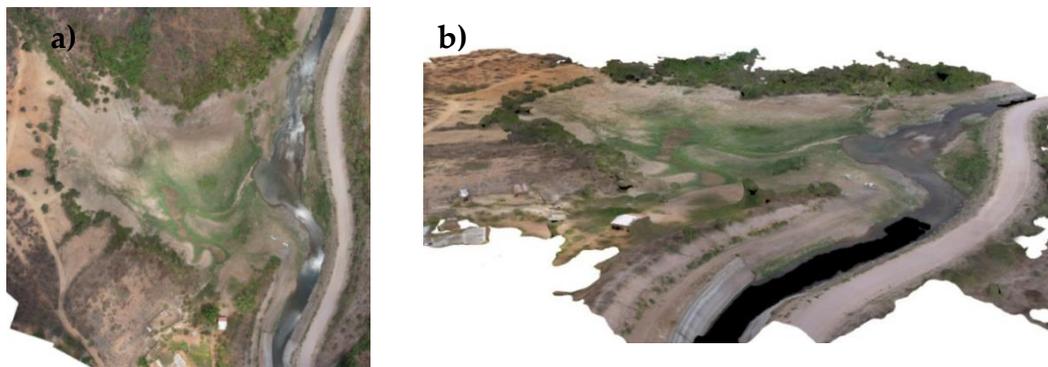


Figura 8.20 Ortomosaico (a) y modelo de elevación digital (b) del dique 1 del Distrito de Riego 010, Culiacán, Sinaloa, México.

Aplicaciones en las áreas de riego y drenaje

Potencialmente se pueden identificar cuatro grandes áreas de interés geográfico para la aplicación de los VANTs en zonas de riego, primeramente i) la cuenca de abastecimiento de la zona de riego, donde se localizan las fuentes de abastecimiento de agua, posteriormente ii) la infraestructura necesaria para conducir el agua de la fuente a la parcela así como drenar los excedentes del agua de riego, así como iii) la aplicación del riego e insumos a la parcelas, y por último, iv) el monitoreo del estado hídrico y desarrollo de los cultivos.

La estimación remota del desarrollo, crecimiento y de la evapotranspiración de los cultivos en uno de los retos en donde se han concentrado grandes esfuerzos ya que la calendarización de los insumos agrícolas como riego y fertilizantes está asociado a la fenológica de los cultivos. Vuolo et al (2015) han reportado que los satélites proporcionan imágenes que han sido usadas para la estimación de la evapotranspiración de referencia y necesidades hídricas de los cultivos a nivel regional o nacional a través de parámetros biofísicos asimilados en modelos agrometeorológicos, pero sin embargo su uso a nivel parcelario es restringido por la limitada resolución espacial y temporal de las imágenes satelitales, las observaciones termales y la complejidad de los algoritmos para implantar procedimientos operacionales en tiempo real.

La gestión de una zona de riego implica una serie de actividades cíclicas durante el desarrollo de un año agrícola en donde están actividades de planeación, presupuestación, programación, implantación, monitoreo, y evaluación. Sin duda los VANTs son una herramienta potencial para apoyar en la estimación de cultivos establecidos, para conocer el estado del riego parcelario, para detectar zonas de baja eficiencia de riego, y para una diversidad de actividades requeridas para monitorear y evaluar el servicio de riego a los usuarios.

A nivel parcela, la aplicación de los insumos y manejo de los recursos, entre ellos la aplicación del riego, son tareas que requieren de un monitoreo frecuente. La Figura 8.21 muestra un ortomosaico generado por los autores obtenido de varias imágenes traslapadas tomadas con un VANT durante la aplicación del primer riego con un sistema de riego por goteo donde se aprecia una gran variación espacial en la aplicación del agua por el sistema. Sin duda, los vehículos aéreos pueden

proporcionar información detallada para evaluar la aplicación espacial y temporal del riego.



Figura 8.21 Mosaico generado de fotografías tomadas desde un VANT tipo hexacóptero durante la aplicación del primer riego usando un sistema de riego por goteo en Chapingo, México.

Conclusión

Los vehículos VANT están en pleno desarrollo y cada vez es más común su aplicación en la agricultura, aporta nuevas aplicaciones no solo para adquisición de imágenes sino también para análisis de datos espacio-temporales. La continua tendencia del desarrollo de componentes miniaturizados promete una era de sistemas de teledetección a niveles extraordinarios de precisión no solo en el desarrollo de sensores miniaturizados sino en la precisión de navegación, trayendo con esto la posibilidad de establecer de forma remota los sitios de estudio a alta resolución y frecuencia.

Los VANTs se perfilan como herramientas de apoyo en procesos de planeación, supervisión y estimación de parámetros y variables hidroagrícolas, que puede ejecutar procesos eficientes en costo y tiempo. En ingeniería hidroagrícola, el uso de VANTs será una herramienta indispensable para la toma de datos espaciales que permitan la discriminación de características de terreno relacionados con el uso, manejo y aplicación óptima de los insumos agrícolas y el uso eficiente de los recursos agua, suelo y energía.

El mayor problema que se enfrentan en el uso de VANTs, es su alto costo inicial por los sensores demandados para obtener imágenes de alta resolución, el tiempo de

vuelo, y su capacidad de carga, así como la habilidades requeridas para su operación y para el procesamiento de grandes volúmenes de información; no obstante, se presenta un tendencia en el abatimiento de los costos, en mejores equipos y con mayor frecuencia se reportan aplicaciones hidroagrícolas usando estos equipos.

Referencias

- Agapiou, A., Alexakis, D. D., Themistocleous, K., Sarris, A., Perdikou, S., & Clayton, C., & Hadjimitsis, D. G. (2014). Investigation of Ground Remote Sensing Techniques for Supporting an Early Warning Water-Leakage System, Integrated Use of Space, Geophysical and Hyperspectral Technologies Intended for Monitoring Water Leakages in Water Supply Networks, Dr. Diofantos Hadjimitsis (Ed.), ISBN: 978-953-51-1729-2, InTech, doi: 10.5772/59531.
- Ben-Dor, E. (2010). Characterization of soil properties using reflectance spectroscopy. Ch. 22. In P. S. Thenkabail, J. G. Lyon, & A. Huete (Eds.), *Hyperspectral remote sensing of vegetation* (pp. 705). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Bourennane, H., Nicoullaud, B., Couturier, A., & King, D. (2004). Exploring the spatial relationships between some soil properties and wheat yields in two soil types. *Precision Agriculture* 5:521-536. doi: 10.1007/s11119-004-5323-z
- Buccolieri, A., Buccolieri G., Dell'Atti A., Strisciullo G., & Gagliano-Candela, R. (2010). Monitoring of total and bioavailable heavy metals concentration in agricultural soils. *Environ Monit Asses* 168:547-560. doi: 10.1007/s10661-009-1133-0
- Chao, H., & Chen, Y. (2012). *Remote sensing and actuation using unmanned vehicles*. Wiley. 198 pp. New Jersey, USA.
- Chen, C., Sinaj, S., Condrón, L., Frossard, E., Sherlock, R., & Davis, M. (2003). Characterization of phosphorus availability in selected New Zealand grassland soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65:89-100. doi: 10.1023/A:1021889207109
- Clay, D. E., Kim, K.-I., Chang, J., Clay, S. A., & Dalsted, K. (2006). Characterizing water and nitrogen stress in corn using remote sensing. *Agronomy Journal*, 98, 579e587. doi: 10.2134/agronj2005.0204
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 92, 79-97. doi: [10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013)
- Deering, D.W. (1978). *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors*. Ph. D. Diss. Texas A&M Univ., College Station, 338p.

- Eisenbeiss, H. (2009). UAV Photogrammetry. Ph.D. Thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Zurich, Switzerland, p. 235.
- Farah, A., Talaat, A., Farrag, F. (2008). Accuracy assessment of digital elevation models using GPS. *Artif. Satellites*, 43, 151–161. doi: [10.2478/v10018-009-0014-7](https://doi.org/10.2478/v10018-009-0014-7)
- Fernández-Pacheco, D. G., D. Escarabajal-Henarejos, A. Ruiz-Canales, J. Conesa, J. M. Molina-Martínez. (2014). A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosystems engineering*. 117:23-34.
- Fidanza, M. (2007). Characterization of soil properties associated with type-I fairy ring symptoms in turfgrass. *Biologia*, Bratislava 62:533-536. doi: 10.2478/s11756-007-0105-5
- Huang, Y., Fipps, G., Maas, S. J., & Fletcher, R. (2009). Airborne remote sensing for detection of irrigation canal leakage. *Irrigation and Drainage*; doi: 10.1002/ird.511. doi: 10.1002/ird.511
- Idso, S. B. 1982. Non-Water-Stressed Baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* 27:59-70.
- Jackson, R. D. (1984). Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. *Proc. SPIE* 0475: 81-96.
- Küng, O., Strecha, C., Beyeler, A., Zufferey, J.C., Floreano, D., Fua, P., & Gervais, F. (2011). The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery. In *IAPRS, Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)*, Zurich, Switzerland, 14–16 September 2011; 2011; 38.
- Leyva, R. L. Z., Alves de Souza, C. M. & Orlando, R. C. (2001). Agricultura de precisión. *Ciencias Técnicas agropecuarias*, X (3), pp. 7-11.
- Liu, P., Chen, A. Y., Huang, Y. N., Han, J. Y., Lai, J. S., Kang, S. C., & Tsai, M. H. (2014). A Review of Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Developments and Applications in Civil Engineering. *Smart Structures and Smart Systems*, 13 (6), 1065-1094. doi: 10.12989/sss.2014.13.6.1065
- Moller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., et al. (2007). Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 58, 827e838. doi: 10.1093/jxb/erl115

- Moussa-Ouédraogo, M., Degré, A., Debouche, C., & Lisein, J. (2014). The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. *Geomorphology* 214 (2014) 339–355. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.02.016
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering*. 114:358-371. doi: [10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009)
- Nonami, K., Kendoul, F., Suzuki, S., Wang, W., & Nakazawa, D. (2010). *Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles*. Springer. doi: 10.1007/978-4-431-53856-1
- Ortega, B., R. & F. M. L. (2001). *Agricultura de precisión, Quilamapu, Chile*: INIA.
- Parvage, M., Ulén, B. & Kirchmann, H. (2013). A survey of soil phosphorus and nitrogen in Swedish horse paddocks. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 178:1-9. doi: [10.1016/j.agee.2013.06.009](https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.06.009)
- Pinter, P. J., Jr., Hatfield, J. L., Schepers, J. S., Barnes, E. M., Moran, M. S., Daughtry, C. S. T., et al. (2003). Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69, 647e664.
- SCT (Secretaria de Comunicaciones y Transportes). 2015. Circular obligatoria que establece los Requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS). CO AV-23-10 R2. Dirección General de Aeronáutica Civil. México, D.F. 27 pp.
- Qiao, M., C. Cai, Huang, Y., Liu, Y., Lin, A., & Zheng, Y. (2011). Characterization of soil heavy metal contamination and potential health risk in metropolitan region of northern China. *EnvironMonitAsses* 172:353-365. doi: 10.1007/s10661-010-1339-1
- Ronconi, G. B. A., Batista, T. J., & Merola, V. (2014). The utilization of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for military action in foreign airspace. *UFRGSMUN/ UFRGS Model United Nations Journal*. v.2, 2014, p. 137-180.
- Rossini, M., F. Fava, S. Cogliati, M. Meroni, A. Marchesi, C. Panigada, C. Giardino, L. Busetto, M. Migliavacca, S. Amaducci, R. Colombo. (2013). Assessing canopy PRI from airborne imagery to map water stress in maize, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 86:168-177.
- Shanahan, J. F., Schepers, J. S., Francis, D. D., Varvel, G. E., Wilhelm, W. W., Tringe, J. M., et al. (2001). Use of remote sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal*, 93, 583e589. doi: 10.2134/agronj2001.933583x

- Smith, R., Baillie, J., McCarthy, A., Raine, S. & Baillie, C. (2010). Review of Precision Irrigation Technologies and their Application. Primera edición ed. Toowoomba: National Centre for Engineering in Agriculture Publication.
- Torres-Sánchez, J. , J.M. Peña, A.I. de Castro, F. López-Granados. 2014. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture* 103:104–113.
- van Blyenburgh, P. (2013). RPAS Yearbook: Remotely Piloted Aircraft Systems: The Global Perspective 2013/2014. Technical Report. UVS International. Paris, France.
- Viscarra Rossel, R. A., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J., & Skjemstad, J. O. (2006). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131, 59e75. doi:10.1016/j.geoderma.2005.03.007
- Vuolo, F., G. D’Urso, C. De Michele, B. Bianchi, M. Cutting. (2015). Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for different experiences from Europe to Australia, *Agricultural Water Management*. 147:82-95.
- Xiang, H., & Lei, T. (2011). Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems engineering*. 108:174-190. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.11.010
- Yang, C., Everitt, J. H., Bradford, J. M., & Escobar, D. E. (2000). Mapping grain sorghum growth and yield variations using airborne multispectral digital imagery. *Transactions of the ASAE*, 43, 1927e1938. doi: 10.13031/2013.3098
- Young, S., Wilson, M., Hillier, S., Delbos, E., Ali, S., & Stoltzfus, R. (2010). Differences and commonalities in physical, chemical and mineralogical properties of Zanzibari geophagic soil. *J. Chem Ecol* 36:129-140. doi: 10.1007/s10886-009-9729-y
- Zarco-Tejada, P. J., Diaz-Varela, R., Angileri, V., & Loudjani, P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3Dphoto-reconstruction methods. *Europ. J. Agronomy* 55:89–99. doi: 10.1016/j.eja.2014.01.004
- Zhang, C. & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture* 13, 693-712. doi: 10.1007/s11119-012-9274-5

Dirección institucional de los autores

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso

62550 Jiutepec, Morelos, México

Teléfono: + (52) (777) 329 3600, extensión 440

wojeda@tlaloc.imta.mx

Dr. Alberto González Sánchez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso

62550 Jiutepec, Morelos, México

Teléfono: + (52) (777) 329 3600, extensión 115

alberto_gonzales@tlaloc.imta.mx

M.I. Azucelli Maythe Mauricio Pérez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso

62550 Jiutepec, Morelos, México

Teléfono: +(52) (777) 329 3600, extensión 445

mauricioazucelli@hotmail.com

Dr. Jorge Flores Velázquez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso

62550 Jiutepec, Morelos, México

Teléfono: +(52) (777) 329 3600, extensión 445

jorge_flores@tlaloc.imta.mx

8.6 Anexo 6. Ponencias presentadas al I Congreso Nacional de Riego y Drenaje, COMEII 2015

8.6.1 Los vehículos aéreos no tripulados y la agricultura de precisión

LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS Y LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Waldo Ojeda Bustamante¹; Azucelli Mauricio¹; Alberto González¹; Jorge Flores¹

¹ Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550.

Resumen

El desarrollo de las tecnologías de información y comunicación empieza también a impactar en los sistemas productivos agrícolas, lo que ha traído nuevas alternativas para la mejora de procesos y tareas agrícolas que demandan grandes volúmenes de información para su mejor planeación, administración, gestión, y evaluación. Con la puesta en órbita de satélites se facilitó el monitoreo de la superficie terrestre al capturar imágenes espectrales e incorporar nuevos métodos de análisis, procesamiento y despliegue de información espacial de variables de interés agrícola. Sin embargo, ante la demanda de información detallada, los satélites tienen la limitante de suministrar información temporal discontinua y de baja resolución. Ante estas limitaciones, el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) equipados con sensores multifuncionales pequeños, complementados con sistemas de navegación autónoma, es una alternativa viable de bajo costo para monitorear zonas agrícolas. La agricultura de precisión se basa en efectuar la aplicación correcta de insumos agrícolas, en el momento adecuado, en el lugar preciso, y con la dosis de óptima demandada por los cultivos apoyada con herramientas que facilitan el monitoreo frecuente y la automatización de los procesos requeridos. Siendo las variables de interés agrícola, que definen la producción y desarrollo de los cultivos, de alta variabilidad espacial y temporal, en este trabajo se analiza y documenta la aplicación de los drones o VANTs como una herramienta de apoyo para la agricultura de precisión.

Palabras clave: Drones, monitoreo, variables agrícolas, sensores remotos.

Introducción

El monitoreo de variables del sistema agua-suelo-planta-atmósfera, de interés para implantar acciones de agricultura de precisión, consume tiempo y recursos económicos, instrumentales y humanos, por la cantidad de datos que se requieren para tomas de decisiones oportunas y robustas, aunado a la dificultad para acceso a zonas agrícolas, por lo que frecuentemente el monitoreo de variables de interés agrícola es deficiente, disperso y requiere de un tratamiento previo para revisar su calidad y realizar una interpolación espacial.

Diversas técnicas se han usado para compilar y monitorear la información de interés agrícola relacionados con el estado/condiciones de parcelas, cultivos, infraestructura, y ambiente de manera confiable y actualizada. Los sistemas de información geográfica han sido la principal herramienta informática para integrar la información espacial en mapas.

A partir de los 80s con la puesta en órbita de satélites, se ha facilitado el monitoreo de la superficie terrestre con la incorporación de tecnología de sensores remotos que ha sido apoyado con la mejora en métodos para análisis, procesamiento y despliegue de información espacial de variables de interés agrícola. Sin embargo, ante la demanda de información detallada, los satélites tienen la limitante de suministrar información temporal discontinua, un par de imágenes por mes, e información espectral de baja resolución.

Los vehículos aéreos no tripulados, también conocidos como VANTs, UAVs, o más comúnmente como drones, son una alternativa actual para estimar en forma remota variables de interés agrícola, de alta variabilidad espacial y temporal.

Los VANTs han sido estudiados y aplicados en el mundo desde hace varios años, sin embargo, su aplicación agrícola en México es prácticamente nueva y se requiere su difusión y discusión. Ante la necesidad de documentar la aplicación de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la agricultura de precisión, en este trabajo se presentan diferentes aplicaciones reportadas en la literatura para facilitar su difusión y discusión de este tipo de herramientas.

Bases teóricas

El propósito de los sensores remotos es adquirir información de la superficie terrestre sin estar en contacto con ella, a través de la radiación electromagnética emitida (Chao y Chen, 2012). Como fue comentado por Mulla (2013), la agricultura del futuro es probable que demande mucha más información de alta resolución espacial y temporal que la que se utiliza ahora. Es posible ahora tener un manejo árbol por árbol mediante una colección masiva de datos y su análisis solamente puede realizarse con fines de investigación. Los avances en sensores remotos basados en el uso de satélites, VANTs, sensores portátiles, o robots móviles pueden estimar densidad de malezas, altura del cultivo, reflectancia del follaje, grado de estrés, humedad del suelo y otras propiedades importantes para la toma de decisiones en el manejo de plagas, enfermedades, riego y fertilización de un cultivo.

La aplicación de los sensores remotos en la agricultura está basada en la interacción de la radiación electromagnética con el suelo y el follaje. Este enfoque típicamente requiere de la estimación de la radiación reflejada, en lugar de la radiación transmitida.

Cada cultivo y suelo tiene su propia firma espectral, en consecuencia un suelo tiene una región espectral donde la reflectancia es más fuerte dependiendo de sus constituyentes (Ben-Dor, 2010). Diferentes mezclas de suelo desnudo y cobertura de cultivo son captadas por sensores remotos que obligan a usar métodos y equipos para diferenciar las zonas con suelo y cultivo. La Figura 8.22 muestra diferencias en la reflectancia de una parcela de papa con suelo seco y húmedo, y con presencia de cultivo con dosis de N alta y baja.

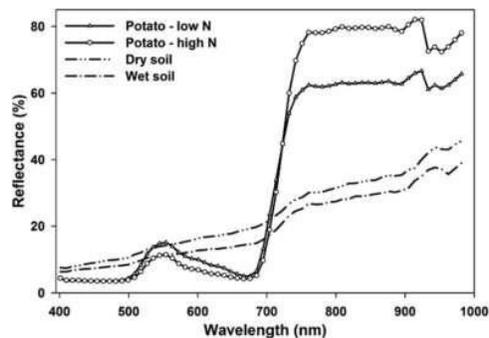


Figura 8.22 Variación en la reflectancia de una parcela de papa en función de su estado de desarrollo y fertilización (Ben-Dor, 2010).

Una limitación severa de las imágenes espectrales capturadas por satélites o aviones convencionales es la presencia de nubes (Moran, Inoue, & Barnes, 1997). Por lo que los sensores remotos instaladas en plataformas cercanas a la superficie terrestre, como los VANTs, son menos afectadas por este factor. Una diversidad de aplicaciones de los sensores remotos en la agricultura se ha reportado en la literatura. Estimación del rendimiento y biomasa (Shanahan et al., 2001), estrés hídrico y nutricional (Bastiaanssen, Molden, & Makin, 2000); grado de infestación de malezas (Lamb & Brown, 2001); insectos y enfermedades (Seelan, Laguette, Casady, & Seielstad, 2003), y las propiedades del suelo como materia orgánica, humedad, contenido de arcilla y pH por Christy (2008), así como salinidad por Corwin & Lesch (2003).

Origen y aplicación general de los VANTs

En su forma más general, un VANT (o UAV, de Unmanned Aerial Vehicle) es un vehículo aéreo reusable controlado de forma remota, semi-autónomo, autónomo o con alguna combinación de estas capacidades (Eisenbeiss, 2009), que está acondicionada para colocar dispositivos auxiliares operados a distancia o pre-programados para diversos fines. El uso de los VANTs se remonta al siglo XIX con la utilización de globos aerostáticos no piloteados para bombardear ciudades, como en la guerra de Austria contra Venecia en 1849 (Ronconi, Batista & Merola, 2014). Los VANTs modernos comienzan su historia el 4 de mayo de 1924, cuando Étienne Oehmichen construyó un helicóptero de cuatro rotores con despegue vertical. Posteriormente, la tecnología de radio permitió el surgimiento de objetivos aéreos teledirigidos, los cuales fueron llamados drones, término que se empleó por primera vez en 1936 (Ronconi, Batista & Merola, 2014).

Equipo VANT que consta de:

- Autopiloto. Un autopiloto es un sistema micro-electromecánico usado para guiar al VANT sin asistencia de un operador, consiste de hardware y software de soporte.
- Fuselaje (estructura). La estructura donde todos los dispositivos son montados.
- Carga útil. Es la carga del VANT que pueden ser cámaras de diferentes bandas espectrales u otros dispositivos de emisión como LIDAR.

- Subsistema de comunicación. La mayoría de los VANTs cuentan con más de un enlace inalámbrico. Por ejemplo, enlace RC y WiFi de enlace para compartir datos.

Las principales ventajas de los VANTs son:

- No se arriesgan vidas humanas ante el malfuncionamiento del vehículo.
- Útil para aquellas zonas de difícil acceso geográfico, orden público, volcanes, incendios, concentración de radioactividad, zonas de desastre como deslaves o inundaciones entre otros.
- Posibilidad de obtener fotografías aéreas de alta resolución, en tiempo real si se cuenta con el equipo y accesorios.
- No presenta problemas por condiciones atmosféricas (nubosidad) que impide la utilidad del uso de imágenes de satélite, ya que la altura de vuelo puede ser por debajo de las nubes.
- Bajo costo en la adquisición de imágenes aéreas.
- Adquisición de imágenes aéreas en “casi” cualquier momento.

Las principales desventajas de los VANTs son:

- Dependen de una estación de seguimiento en tierra.
- Vulnerabilidad a varios factores ambientales, aves, aviones, redes eléctricas, etc.

Limitaciones de peso de carga:

- Dificultad de integración en el espacio aéreo.
- Requiere de equipo auxiliar de bajo peso y volumen que generalmente son caros.
- Limitación en la duración y alcance de los vuelos por limitada capacidad de carga de equipo y baterías.
- Sujeto a regulación y normatividad de uso del espacio aéreo. En algunos países se limita su uso debido a la dificultad de obtener permisos de vuelo.

En el Cuadro 8.3 se hace una comparación entre las aeronaves tripuladas y no tripuladas para usos similares.

Cuadro 8.3 Beneficio de los vehículos no tripulados (VANTs) frente a los aviones tripulados (Díaz et al., 2014).

| Característica | VANT | Avión |
|------------------------|-------|-------|
| Permanencia/autonomía | Media | Baja |
| Velocidad | Baja | Alta |
| Alcance | Media | Baja |
| Penetración | Alta | Alta |
| Maniobrabilidad | Alta | Media |
| Precisión | Media | Baja |
| Capacidad de respuesta | Media | Alta |
| Previsibilidad | Media | Baja |
| Autonomía | Media | Baja |
| Restricción de uso | Alta | Media |
| Coste de adquisición | Alta | Media |
| Factor humano | Media | Alta |
| Multiusos | Alta | Alta |

La dinámica de un VANT puede ser modelado usando las siguientes variables de estado:

- Posición. Longitud, latitud, y altura.
- Velocidad en tres ejes (x,y,z).
- Tasa de giro.
- Aceleración (ax, ay, az).
- Velocidad en el aire, en el terreno, ángulo de ataque, ángulo de desplazamiento.

Como lo indicaron Chao y Chen (2012), una de las ventajas de los VANTs sobre el uso de aviones tripulados es el vuelo en bajas altitudes (menos de 100 m sobre la superficie terrestre). Sin embargo, el uso de VANT puede ser afectado por los siguientes factores:

- i. *Viento*. Las ráfagas de viento son un problema en la estabilidad de vehículos aéreos de poca masa.
- ii. *Altura de vuelo*. Dependiendo del tipo de misión, un VANT debe volar a diferente altura para cumplir con su objetivo.
- iii. *Variación de la carga*. Un VANT debe ser capaz de soportar variaciones en su carga, sin afectar su estabilidad y funciones.

- iv. *Variaciones en la construcción.* Pueden existir variaciones en la construcción de los VANTs que afecten sus características.
- v. *Limitación de recursos.* Una de las limitaciones actuales de los VANTs son los recursos que pueden integrarse en sus misiones de vuelo como la resolución de sus sensores, poder computacional, limitado tamaño y peso de los sensores. Una restricción usual es el costo.

VANTs y la agricultura de precisión

La agricultura de precisión consiste en efectuar la aplicación precisa y oportuna de los insumos agrícolas, en el momento adecuado, en el lugar preciso en un cultivo y con la dosis de insumos óptima (Gil, 2002), mediante el uso de la automatización (Leyva, Alves de Souza & Orlando, 2001) para su monitoreo y aplicación variable en función de la variabilidad espacial y temporal de los factores que limitan el desarrollo y productividad de los cultivos.

Un aspecto importante en la agricultura de precisión es la detección de zonas diferenciadas en función de parámetros o valores específicos, tales como vigor, madurez, o estrés. El uso de VANTs para estas tareas es crucial para definir zonas de intervención diferencial o con problemas de desarrollo. Entre los factores a determinar en aplicaciones agrícolas además de las características del vehículo aéreo, sin duda será el tipo de sensor y cámara que pueda ser montada. Existe una amplia gama de opciones de cámaras a usar dependiendo de lo que se pretenda captar. Esa diversidad contempla el peso del equipo, el tamaño, resolución, versatilidad, etc.

Un VANT se puede equipar con cámaras que pueden tomar imágenes multiespectrales en un rango específico del espectro solar. Por ejemplo el rango infrarrojo además del visual, que se pueden combinar para crear una imagen del cultivo que destaca las diferencias entre las plantas sanas y enfermas que el ojo humano no puede distinguir con facilidad. En la Figura 8.23 un Dron de la marca PrecisionHawk equipado con múltiples sensores para tomar imágenes de los campos capta la vegetación con luz casi infrarroja para mostrar los niveles de clorofila (Anderson, C. 2014).

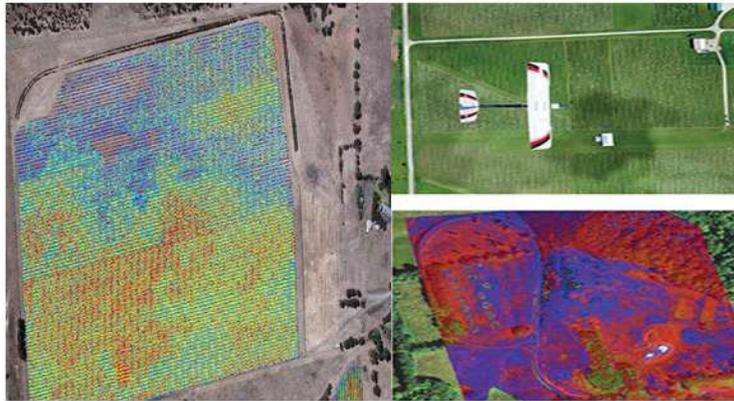


Figura 8.23 Imágenes multiespectrales captadas por un VANT (Anderson, 2014).

El monitoreo aéreo puede revelar patrones que ponen al descubierto todo tipo de incidencias o anomalías nutricionales, hídricas o sanitarias.

Un VANT puede monitorear las parcelas con alta frecuencia, cada semana, cada día o incluso cada hora. La combinación de estas imágenes para crear una serie temporal, permite observar los cambios en la densidad y coloración foliar, revelando áreas problemáticas y las oportunidades que hay para gestionar, mejorar o corregir.

Un área de aplicación emergente del uso de VANTs con fines de caracterización de la variabilidad en el estado de los cultivos a una alta resolución y frecuencia es la obtención de índices de verdor de parcelas cultivadas. Varios índices de verdor han sido propuestos para monitorear a través de sensores remotos, a través de variables integrales asociadas al desarrollo y estado de cultivos. Verger *et al.* (2104) describió un algoritmo físicamente basado para estimar el índice de área verde (GAI por sus siglas en inglés) usando un VANT (Figura 8.24a) equipado con cuatro cámaras (Figura 8.24b), una para el espectro verde (550 nm), para el rojo (660 nm), borde rojo (735 nm) e infrarrojo (790 nm). La sensibilidad espectral de las cuatro bandas asociadas a las cámaras instaladas en el VANT se presenta en la Figura 8.25. Los resultados obtenidos del estudio indican una muy buena aproximación de los valores del GAI obtenidos con el VANT con respecto a estimaciones terrestres.

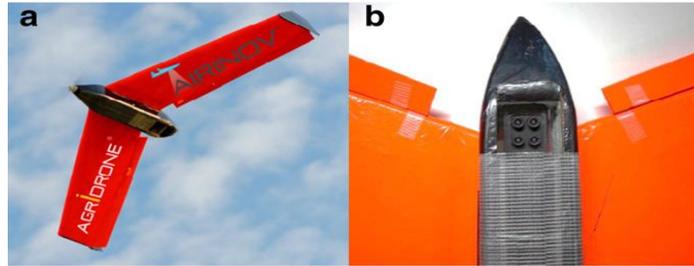


Figura 8.24 a) VANT usado y (b) vista de cuatro cámaras CMOS integradas (Verger *et al.*, 2104).

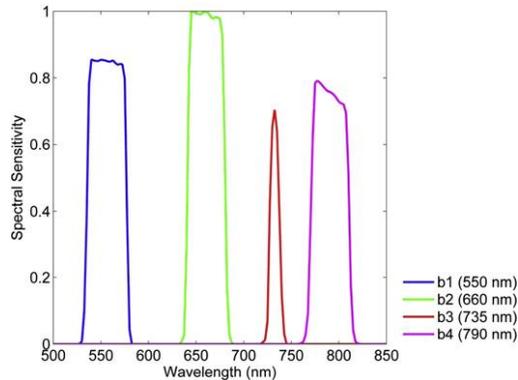


Figura 8.25 Sensitividad espectral contrastante de las cuatro bandas asociadas a las cámaras del VANT usado (Verger *et al.*, 2104).

1 Uno de los problemas de las plataformas aéreas tradicionales como aviones y satélites es su baja resolución espacial y temporal. Torres-Sánchez *et al.* (2014) usaron un VANT (Figura 8.26) equipado con una cámara comercial (espectro visible) para toma de imágenes de alta resolución para detectar el grado de infestación de malas hierbas en una parcela de trigo en sus etapas fenológicas iniciales. Las imágenes se utilizaron para obtener seis índices de vegetación espectral (CIVE, ExG, ExGR, Woebbecke Index, NGRDI, VEG) y dos combinaciones de estos índices para estudiar la influencia de la altura de vuelo (30 y 60 m) y días después de siembra (35 a 75 días) para estimar la fracción de cobertura vegetal. Los resultados indicaron que los índices ExG y VEG fueron los mejores para estimar la fracción de cobertura vegetal para una altura de 60 m. Lo anterior muestra que las imágenes obtenidas con VANTs pueden ser útiles para control de malas hierbas que requieren de algoritmos precisos de clasificación de cultivo-malas hierbas para generación de mapas precisos de fracción vegetal (Figura 8.27).



Figura 8.26 Microdron MD4-1000 volando sobre la zona de estudio (Torres-Sánchez *et al.*, 2014).

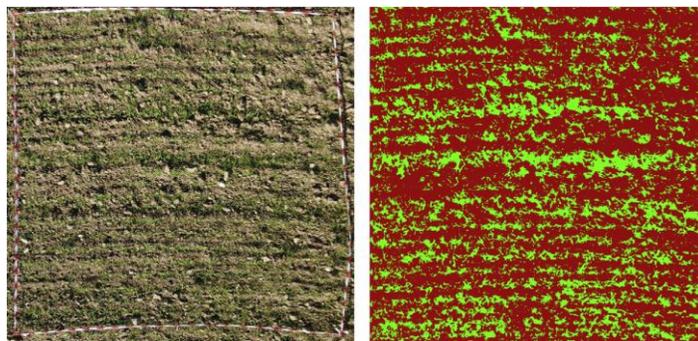


Figura 8.27 Imagen obtenida a 10 m de altura y la imagen después del proceso de clasificación de vegetación Torres-Sánchez *et al.* (2014).

La aplicación de VANTs con fines de estimación del índice de área foliar ha sido reportado por Córcoles *et al.* (2013) para una parcela comercial de cebolla regada por pivote central. Las fotografías fueron tomadas con un cuadricóptero y procesadas con un software para estimar la cobertura de follaje. La relación lineal entre CC y LAI tuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.837.

Los VANTs se han usado en el monitoreo remoto usando imágenes áreas espectrales. Imágenes aéreas de alta resolución Rojo-Verde-Azul (RGB por siglas en inglés) han sido procesadas para definir el periodo de cosechas en vid (Johnson *et al.*, 2003) como se muestra en la Figura 8.28. El uso de VANTs también ha sido reportado para detectar la maduración del café (Johnson, *et al.*, 2004).

Fernández-Pacheco *et al.* (2014) estimaron el coeficiente de cultivo (K_c) de la lechuga en función del porcentaje de cobertura (PGC) obtenido de fotografías digitales. En la Figura 8.29 se presentan los diferentes pasos usados para validar el modelo

propuesto. Con la ayuda de una estación tipo relación Bowen y una estación meteorológica se obtuvieron los valores de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y de la evapotranspiración de referencia (ET_o) para así obtener experimentalmente el coeficiente de cultivo (K_c). Se obtuvo una relación para estimar la altura (h) en función de PGC. Finalizando con la derivación de una relación para estimar K_c en función de PGC. La Figura 8.30 muestra una serie de imágenes sin y después de procesamiento con los valores estimados de (K_c y h) con el procesamiento. Este método tiene un gran potencial de ser aplicado usando un VANT para la obtención de imágenes digitales.



Figura 8.28 VANT en misión de monitoreo de un viñedo (Johnson et al., 2003).

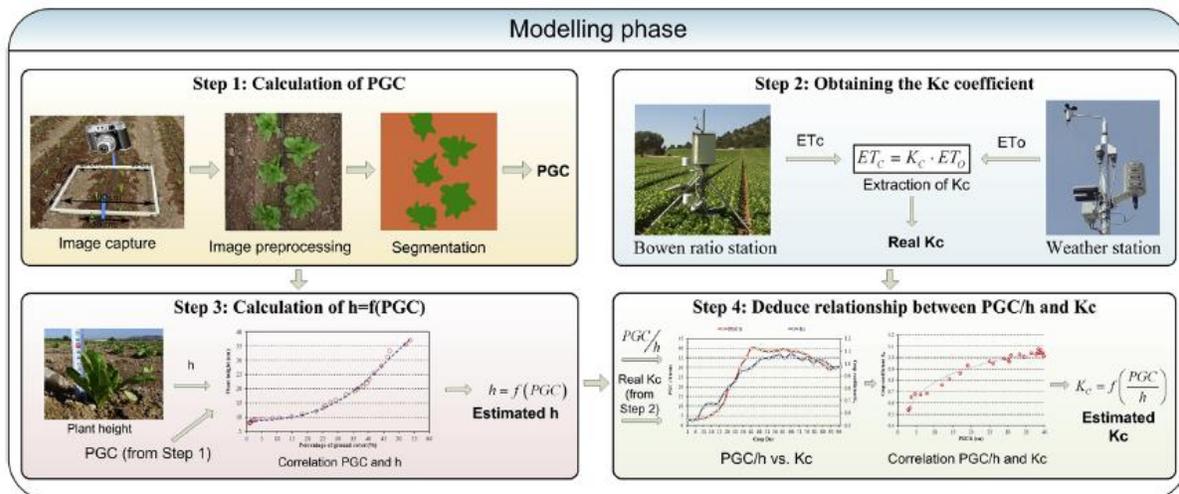


Figura 8.29 Etapas del estudio para calibrar el modelo para estimar el K_c (Fernández-Pacheco et al., 2014).



Figura 8.30 Resultados obtenidos (Kc y h) con el procesamiento de imágenes (Fernández-Pacheco et al., 2014).

Uno de los usos más recurrentes de los VANTS es el seguimiento del estado de los cultivos. Xiang y Lei (2011) mostraron la Figura 8.31, imagen en pseudocolor, para indicar la variación del índice de verdor NDVI en tres fechas que contrastan el manejo del cultivo de pasto. El color rojo representa el pasto con el mayor valor de NDVI asociado a un cultivo con gran follaje. La primera imagen fue tomada un día después de aplicar un herbicida en las dos parcelas internas. La segunda imagen muestra que el pasto de las dos parcelas ha sido prácticamente eliminado y solamente el suelo desnudo permanece. La parcela interna izquierda fue resembrada, como se muestra en la tercera imagen tomada 20 días después de siembra.

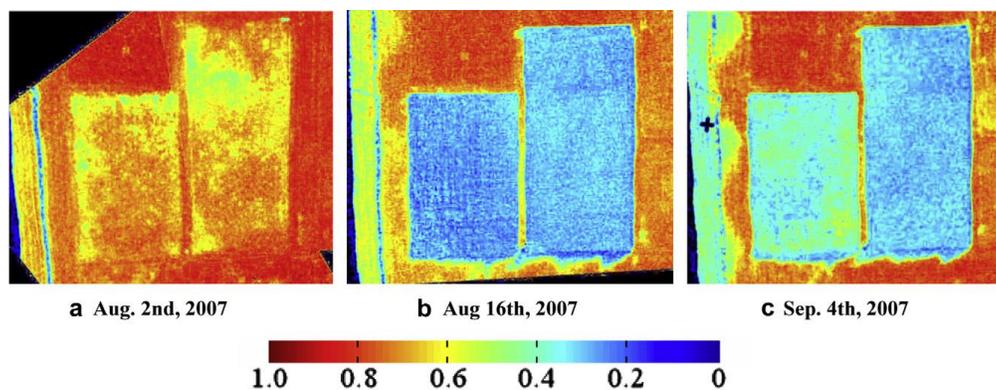


Figura 8.31 Mapa NDVI en Pseudocolor de una parcela de pasto en tres fechas para el año 2007 (Xiang y Lei, 2011).

Uno de los retos actuales en la gestión de cultivos es la estimación de su altura a lo largo de su ciclo fenológico. Zarco-Tejada et al. (2014) realizaron un estudio para estimar la altura de un follaje discontinuo (huerta) usando un VANT equipado con una cámara de bajo costo. El VANT de ala fija usado tuvo una envergadura de 2 m con una plataforma de 5.8 kg de carga y una velocidad terrestre de 63 kmh⁻¹. El VANT usado fue capaz de obtener imágenes en una zona de estudio de 158 ha en una sola misión de vuelo. Se definió la trayectoria de vuelo para generar gran traslape entre imágenes (Figura 8.32). Se obtuvieron imágenes de alta resolución VHR (5 m pixel⁻¹) para generar orto-mosaicos y modelos digitales de superficie usando métodos automáticos de reconstrucción 3D (Figura 8.33). Los autores indican que la metodología usada fue robusta para estimar la altura del árbol y detalle de su corona (Figura 8.34).

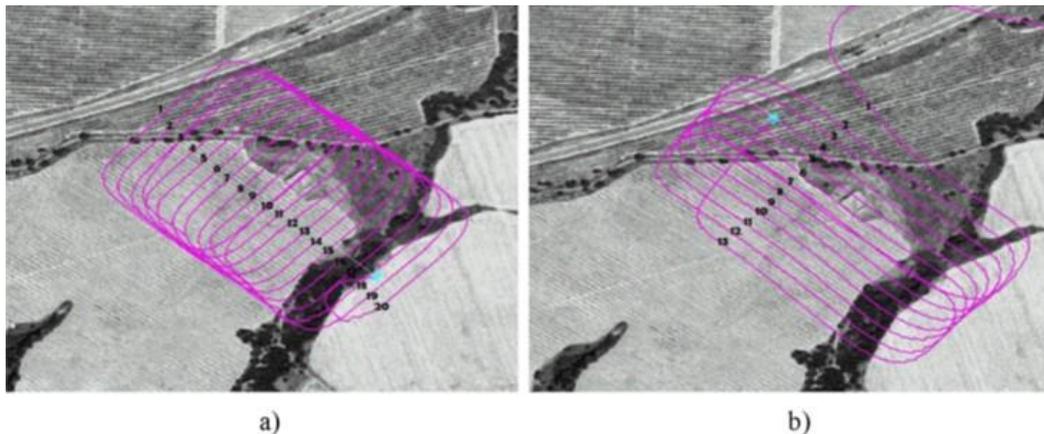


Figura 8.32 Rutas de vuelos usados (este-oeste y norte sur) para asegurar gran traslape de imágenes (Zarco-Tejada et al., 2014).

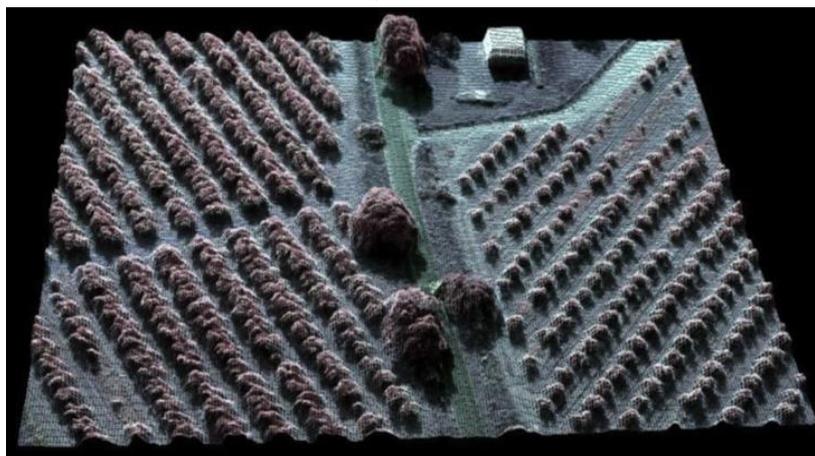


Figura 8.33 Escena tridimensional generada con métodos de foto-reconstrucción usando plataformas basadas en VANTs (Zarco-Tejada et al., 2014).

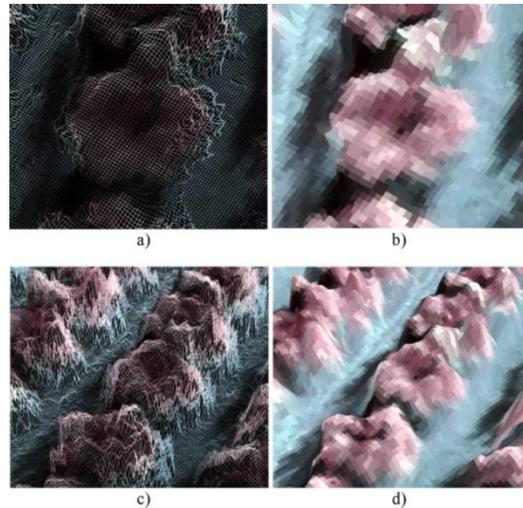


Figura 8.34 Foto-reconstrucción de un árbol obtenida de un VANT (a y c) así como obtenidas con ortomosaicos usando DSM (b y d) para detallar la corona de los árboles (Zarco-Tejada et al., 2014).

El control de insectos y enfermedades de los cultivos es un factor crucial en su manejo óptimo. La aplicación de agroquímicos es frecuentemente requerida en función de condiciones específicas, tal como etapa fenológica, condición ambiental, localización y dosis. Estas aplicaciones son realizadas típicamente con el uso de aspersoras portátiles, fumigadoras o equipo de aplicación aérea. Sin embargo, este tipo de aplicación es recomendable para grandes sistemas de producción, y puede ser ineficiente cuando las aplicaciones son realizadas en áreas pequeñas de una parcela. Zhu *et al.*, (2010) presentaron un VANT (Figura 8.35) equipado con un controlador PWM para aspersiones de agroquímicos de alta precisión, el cual mejoró la eficiencia en la aplicación para el control de plagas agrícolas.

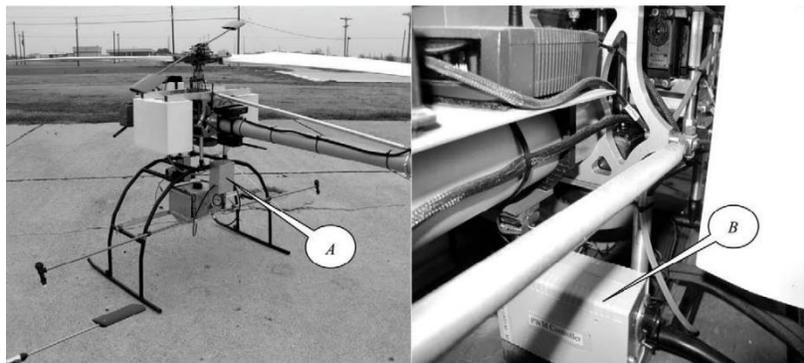


Figura 8.35 VANT usado para la aplicación precisa de agroquímicos (A) equipo de bombeo de pesticidas; (B) caja de controlador (Zhu *et al.*, 2010).

Otra aplicación de los VANTs ha sido orientada a detectar la presencia de la enfermedad Huanglongbing (HLB) o enverdecimiento de los cítricos, que es una de

las enfermedades que afectan los cítricos en USA, México y varias regiones del mundo. Sin embargo, su control óptimo depende de su detección y diagnóstico oportuno. Garcia-Ruiz *et al.* (2013) presentaron una metodología exitosa para su detección remota basada en el uso de VANTs. Se usaron seis bandas espectrales (de 530 a 900 nm) y siete índices de vegetación derivados de una mezcla de bandas. Los valores de los índices NIR-R y reflectancia a 710 nm fueron estadísticamente diferentes para diferenciar entre árboles sanos e infectados. Imágenes espectrales de árboles de cítricos fueron adquiridas a dos alturas usando un plataforma basada en el uso de VANTs. Se usaron imágenes aéreas adquiridas con un aeroplano y con un VANT para detectar árboles sanos (H) e infectados con HLB (D) como se muestra en la Figura 8.36. Los resultados indican que las imágenes en falso color (R = 900 nm, G = 690 nm y B = 560 nm) provenientes del VANT generan mayor resolución y detalle de los árboles (Figuras 8.37 y 8.38).

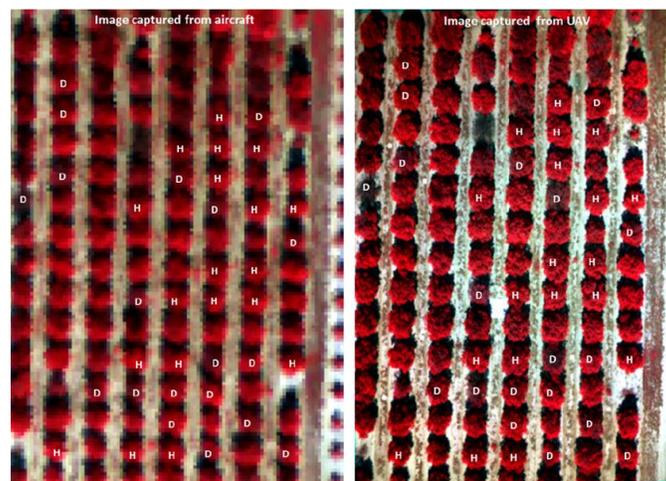


Figura 8.36 Imágenes aéreas adquiridas con un aeroplano (izquierda) y un VANT (derecha) con árboles sanos (H) e infectados con HLB (D) (Garcia-Ruiz *et al.*, 2013).

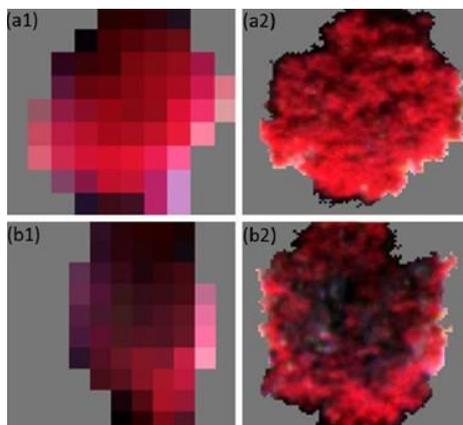


Figura 8.37 Imágenes segmentadas en falso color de un árbol sano (a) e infectado (b). Imágenes izquierda obtenidas con un aeroplano y las de la derecha con un VANT (García-Ruiz *et al.*, 2013).

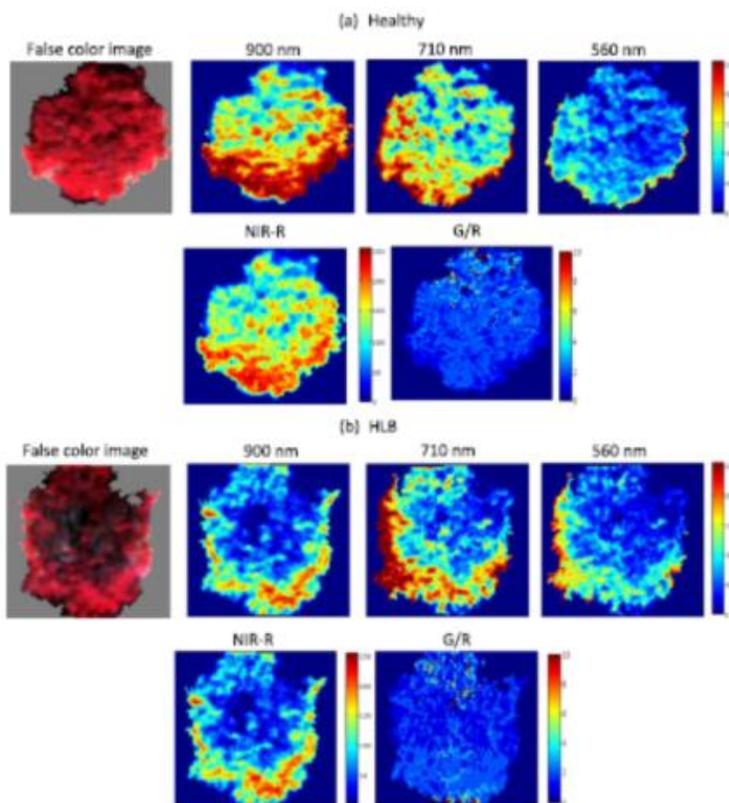


Figura 8.38 Imágenes adquiridas con VANTs en falso color e imágenes con características espectrales significativas de árboles sanos e infectados (García-Ruiz *et al.*, 2013).

Aplicaciones potenciales de los VANTs

- Detección oportuna de problemas que puedan limitar el rendimiento potencial de los cultivos.

- Seguimiento a la aplicación de riegos usando detección de la variabilidad espacial del humedecimiento del suelo y estrés hídrico en las parcelas agrícolas, posiblemente relacionadas a la falta de nivelación adecuada o diferencias en tipos de suelo, además de malas prácticas de riego.
- Monitoreo temporal y espacial del grado de desarrollo de los cultivos, para detectar el momento adecuado para la cosecha y tiempos de actuación para aplicación de insumos o tareas, así como la necesidad de aplicaciones de fertilizantes en partes específicas de las parcelas, donde se detecta un desarrollo deficiente. Se puede realizar un ahorro de tiempo importante, ya que permite cubrir superficies mucho más grandes de lo posible si se tuviera que recorrer el campo a pie.
- Detección del estado fitosanitario de las plantas, ya que un mapa de colores contrastantes puede mostrar la variación espacial de cuanto luz solar absorbe el follaje de las plantas. Lo anterior se utiliza para la detección y monitoreo de plagas y enfermedades de los cultivos a nivel regional, así como el monitoreo temporal y de la extensión espacial de malezas (plantas invasoras) en las parcelas, para la planeación de prácticas de campo como aplicaciones de herbicidas o tratamientos orgánicos, o cultivación manual para eliminar dichas malezas.
- Supervisión del estado de funcionamiento de las redes de canales y regadíos, con sobrevuelos programados periódicamente, a lo largo de los canales, para detectar fugas o losas en mal estado de reparación, y para detectar aplicaciones de riegos no autorizadas.
- Creación de DEMs mediante fotogrametría y SIGs para cuencas agrícolas (todavía falta mejorar la precisión para eliminar errores).

Conclusiones

La tecnología VANT está actualmente en pleno desarrollo y cada vez es más frecuente su aplicación en una diversidad de tareas de interés para la agricultura de precisión. Es una herramienta que será de uso cotidiano, en apoyo a actividades de planeación, supervisión y estimación de parámetros.

Los VANTs facilitan el monitoreo frecuente de variables que demanda la agricultura de precisión para ejecutar procesos eficientes con menor costo y tiempo y mayor resolución que los métodos convencionales.

El uso de VANTs en la agricultura de precisión aumenta la competitividad a través la adquisición de imágenes y análisis de datos espacio-temporal de características del terreno.

El uso de VANTs tiene como principales problemas el alto coste inicial, demanda de preparación especializada de operadores; sin embargo se espera un abatimiento de los costos devenido a la tendencia sobre su uso cada vez más frecuente y gran competencia.

Referencias

- Anderson, C. 2014. Relatively cheap drones with advanced sensors and imaging capabilities are giving farmers new ways to increase yields and reduce crop damage. *Technology Review*, MIT. URL: <http://www.technologyreview.com>.
- Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J., & Makin, I. W. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*. 46:137-155.
- Ben-Dor, E. (2010). Characterization of soil properties using reflectance spectroscopy. Ch. 22. In P. S. Thenkabail, J. G. Lyon, & A. Huete (Eds.), *Hyperspectral remote sensing of vegetation* (pp. 705). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Chao, H., & Chen, Y. (2012). *Remote sensing and actuation using unmanned vehicles*. Wiley. 198 pp. New Jersey, USA.
- Christy, C. D. 2008. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*. 61:10-19.
- Córcoles, J. I., J. F. Ortega, D. Hernández, M. A. Moreno. 2013. Estimation of leaf area index in onion (*Allium cepa* L.) using an unmanned aerial vehicle. *Biosystems engineering*. 115:31-42
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*, 95, 455-471.
- Diaz-Varela, R.A, P.J. Zarco-Tejada, V. Angileri, P. Loudjani. 2014. Automatic identification of agricultural terraces through object oriented analysis of very high resolution

- DSMs and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle. *Journal of Environmental Management* 134 (2014) 117-126.
- Eisenbeiss, H. (2009). UAV Photogrammetry. Ph.D. Thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Zurich, Switzerland, p. 235.
- Fernández-Pacheco, D. G., D. Escarabajal-Henarejos, A. Ruiz-Canales, J. Conesa, J. M. Molina-Martínez. 2014. A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosystems engineering*. 117:23-34.
- Gil, E. (2002). "Situación actual y posibilidades de la agricultura de precisión". Escuela Superior de Agricultura de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Johnson, L. F., S. R. Herwitz, B. M. Lobitz, S. E. Dunagan. 2004. Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 20(6): 845-849
- Johnson. L.F., S. Herwitz, S E. Dunagana, B. Lobitza,b, D. Sullivana, R. Slyea. 2003. Collection of Ultra High Spatial and Spectral Resolution Image Data over California Vineyards with a Small UAV. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment*. November 2003.
- Lamb, D. W., Brown, R. B. 2001. Remote-sensing and mapping of weeds in crops. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 78:117-125.
- Leyva, R. L. Z., Alves de Souza, C. M. & Orlando, R. C. (2001). Agricultura de precisión. *Ciencias Técnicas agropecuarias*, X (3), pp. 7-11.
- Moran, M. S., Inoue, Y., & Barnes, E. M. 1997. Opportunities and limitations for imagebased remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*. 61:319-346.
- Mulla, D. J. 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering*. 114:358-371.
- Ronconi, G. B. A., Batista, T. J., & Merola, V. (2014). The utilization of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for military action in foreign airspace. *UFRGSMUN/ UFRGS Model United Nations Journal*. v.2, 2014, p. 137-180.
- Seelan, S.K., Laguetta, S., Casady, G.M. y Seielstad, G.A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: a learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, 88, 157-169.

- Shanahan, J. F., Schepers, J. S., Francis, D. D., Varvel, G. E., Wilhelm, W. W., Tringe, J. M., et al. (2001). Use of remote sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal*, 93, 583e589. doi: 10.2134/agronj2001.933583x
- Torres-Sánchez, J., J.M. Peña, A.I. de Castro, F. López-Granados. 2014. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture* 103:104–113.
- Verger A., N. Vigneau, C. Chéron, J. Gilliot, A. Comar, F. Baret. 2014. Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. *Remote Sensing of Environment*. 152:654–664.
- Xiang, H., & Lei, T. (2011). Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems engineering*. 108:174-190. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.11.010
- Zarco-Tejada, P. J., Diaz-Varela, R., Angileri, V., & Loudjani, P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3Dphoto-reconstruction methods. *Europ. J. Agronomy* 55:89–99. Doi: 10.1016/j.eja.2014.01.004
- Zhu, H., Lan, Y., Wu, W., W. Clint Hoffmann, Y. Huang, X. Xue, J. Lian, B. Fritz. 2010. Development of a PWM Precision Spraying Controller for Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Bionic Engineering*. 7:276–283.

8.6.2 Agricultura de precisión mediante el uso de tecnologías geoespaciales

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 S/N. 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 de 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) (Liaghat 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 8.39 muestra las diversas aplicaciones de los sensores remotos como relación de la resolución espacial y temporal.

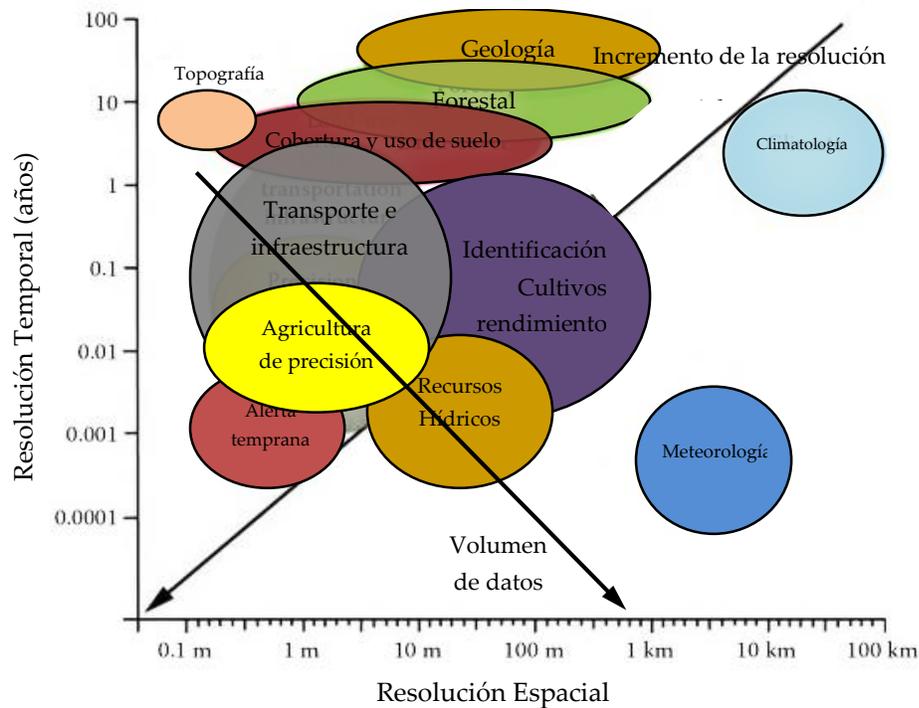


Figura 8.39 Aplicaciones de los sensores remotos en relación a la resolución espacial y temporal requerida (Davis et al. 1991).

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 el siguiente cuadro se muestran algunos índices de vegetación usados en la agricultura de precisión.

Cuadro 8.4 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 8.5 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 8.5 Principales sistemas satelitales usados en AP (Mulla, 2013; DigitalGlobe, 2015).

| Tipo | Plataforma | R. Temp. | R. Espacial (m) | |
|----------|------------|----------|-----------------|----------|
| SATÉLITE | MODIS | 2 días | >30 | 250-1000 |
| | ASTER | 16 días | | 15,30,90 |
| | Landsat | 16 días | | 30 |
| | SPOT 1-5 | 2-3 días | 5 -30 | 5,10,20 |
| | Rapid Eye | 5.5 días | | 6.5 |
| | SPOT 6 | Diario | 1-5 | 2.5,1.5 |
| | CBERS | 5 días | | 2.7 |
| | IKONOS | 3 días | <1 | 0.8 |
| | 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 <math><1.5\text{nm}</math>; 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 8.40 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

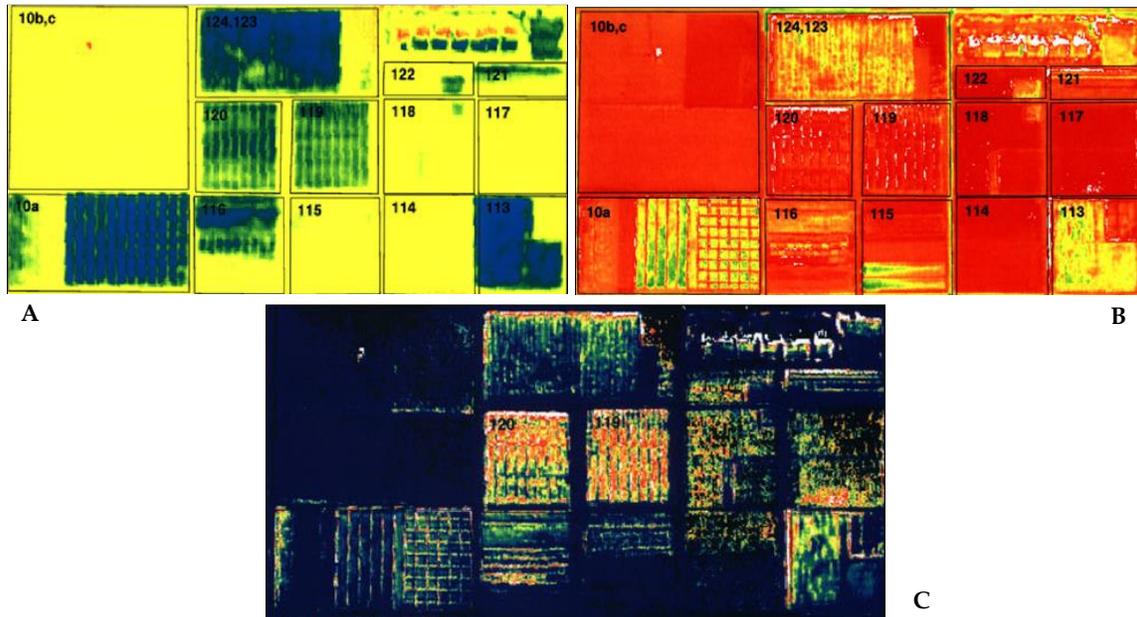


Figura 8.40 Imágenes en falso color de aplicaciones de sensores remotos en agricultura. Todas las imágenes fueron tomadas con el sensor Daedalus montado en un avión de la NASA A) Densidad de vegetación con NDVI, B) Déficit hídrico derivado de reflectancia y temperatura, C) Estrés de cultivos debido a 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 multiespectral 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 8.41 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).

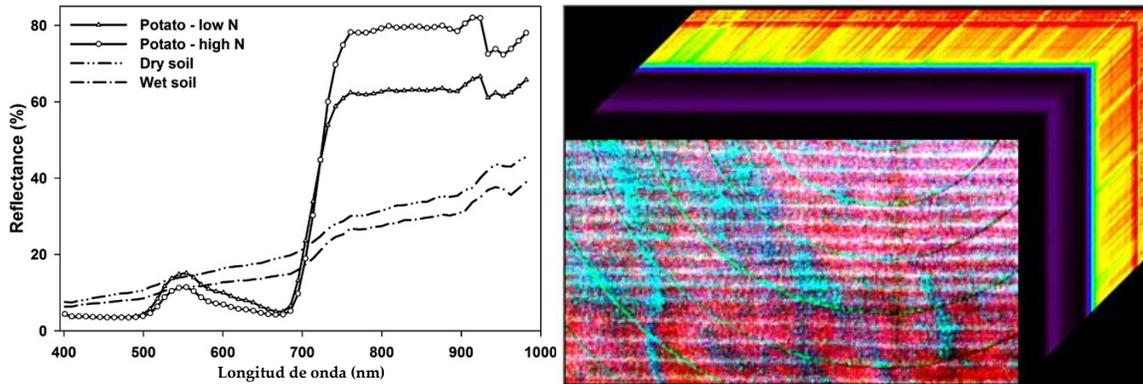


Figura 8.41 Ejemplo de una firma espectral y su correspondiente imagen capturada con un sensor hiperspectral para el cultivo de patata con dos niveles de fertilización de N y diferentes estatus de humedad en el suelo (Mulla, 2013).

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 hiperspectral 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 8.42) 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).

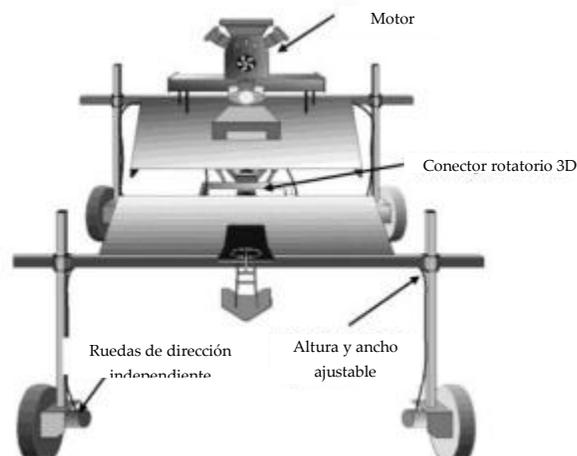


Figura 8.42 Sistema terrestre no tripulado (UGVS) equipado con 4 sensores hiperspectrales para la estimación de diferentes características del cultivo de arroz (Wang et al. 2014).

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 multiespectral 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 hiperespectral 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/F_0 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 October 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 October 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., Laguette, 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.

8.6.3 Determinación de la humedad del suelo mediante el uso de sensores remotos

DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS

Sergio Iván Jiménez Jiménez¹; Mariana de Jesús Marcial Pablo¹; Waldo Ojeda Bustamante²;
Ronald Ernesto Ontiveros Capurata³

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Posgrado en sistemas hidráulicos- Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México.

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Riego y Drenaje- Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México.

³Catedra CONACyT –IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Riego y Drenaje- Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México.

Resumen

El contenido de humedad en el suelo es un parámetro importante para la planificación adecuada del riego, conocer su evolución en tiempo y espacio es de vital importancia para estimar el agua requerida por los cultivos. Para su estimación existen diversos métodos directos e indirectos tales como: gravimétrico, sonda de neutrones, resistencia eléctrica, TDR, mediante sensores remotos, etc. Los métodos directos sólo permiten estimaciones puntuales, con un alcance espacial y temporal muy restringido. Estas limitantes han sido abordadas con el desarrollo de métodos indirectos basados en sensores remotos montados en satélites y vehículos aéreos (tripulados y no tripulados), los cuales cubren extensas superficies agrícolas y son capaces de estimar variables que muestran alta variabilidad. En este trabajo se revisan dos métodos para estimar la humedad del suelo utilizando sensores remotos montados en satélites: el primero utiliza imágenes de la serie Landsat (NASA, 2011) y cuantifica la humedad en función de índices espectrales; el segundo se basa en las imágenes del satélite lanzado por la NASA en Enero del 2015, Soil Moisture Active Passive (SMAP), el cual cuenta con dos sensores (radiómetro y radar), que brindan imágenes de la tierra cada 12 horas, las imágenes de ambos sensores se combinan para obtener una estimación de la humedad del suelo en los 5 primeros centímetros de profundidad, a un periodo de 3 días a 9 km de resolución espacial. Estos métodos permiten mejorar la planificación del riego, determinar rendimientos y monitorear la ocurrencia potencial de sequías, inundaciones e incendios.

Palabras clave: Agricultura de precisión, gestión de zonas agrícolas, balance hídrico, satélites.

Introducción

El contenido de humedad en el suelo es un factor importante para la gestión del riego en zonas agrícolas. El contenido de humedad del suelo incluye dos componentes principales: humedad en la superficie (encontrada en los primeros 10 cm de la capa superior del suelo) y la humedad en la zona radical (encontrada entre los 10 y 200 cm de la capa superior del suelo). La humedad en la superficie del suelo es un componente clave para abordar el intercambio de energía y agua en la superficie terrestre (Hassan-Esfahani et al., 2015).

El contenido de humedad presente en el suelo es influenciado por la lluvia, irrigación o deshielos, y disminuye por la evaporación, transpiración de las plantas y drenaje de agua para las zonas profundas del suelo (OIEA, 2003).

Para la estimación del contenido de humedad del suelo existen diversos métodos directos e indirectos. Las mediciones gravimétricas son muy confiables pero son muy laboriosas y costosas si se aplican a superficie grandes, ya que estas mediciones son puntuales. Las mediciones del contenido de humedad del suelo con TDR y sonda de neutrones no requieren gran inversión de tiempo o instalaciones; sin embargo, la mayoría de estos equipos tienen costos elevados. Los bloques de resistencia eléctrica son relativamente baratos, pero su uso práctico es limitado debido a que operan muy bien en suelos con alto contenido de humedad y su precisión disminuye en caso contrario.

La teledetección y los sensores remotos son una herramienta que permite el análisis de procesos ambientales, físicos de la tierra y socioeconómicos de la población, son capaces de cubrir grandes extensiones de superficie. Diversas ciencias utilizan esta herramienta para resolver problemáticas específicas, en el caso de la agricultura sus principales usos son: el monitoreo de las zonas agrícolas, cobertura vegetal, índices de vegetación, contenido de humedad en el suelo, etc.

Existen métodos que nos ayudan a calcular el contenido de humedad en el suelo por medio de las imágenes satelitales ya sea usando imágenes del infrarrojo térmico o bien con combinación de bandas. La identificación de suelos húmedos a través de

las imágenes satelitales permite obtener información de un área relativamente grande.

El satélite SMAP cuenta con dos sensores: Radiómetro y Radar, los cuales brindan imágenes de la tierra cada 12 horas, las imágenes de ambos sensores se combinan para obtener una estimación de la humedad del suelo en los primeros 5 centímetros; se tienen cuatro niveles de productos del satélite SMAP, los cuales van desde la obtención de los datos en bruto de ambos sensores, hasta el mapa global del contenido de humedad y el estado (congelado o no) del agua en el suelo de toda la superficie terrestre cada 7 días. Los datos de contenido de humedad se reportan en volumen de agua en relación al volumen de suelo (cm^3/cm^3).

Contenido de humedad en el suelo

La humedad del suelo se refiere a la cantidad de agua por volumen de suelo que existe en un área determinada. Conocer la humedad del suelo permite determinar el momento adecuado para aplicar el riego, así como mejorar las capacidades de predicción de los modelos meteorológicos y climáticos, predicción de inundaciones y capacidades de monitoreo de sequías, (NASA, 2015). La cantidad excesiva de agua reduce el crecimiento de las plantas, arrastra los nitratos a una profundidad superior al alcance de las raíces y desplaza el aire contenido en el interior del suelo lo que provoca la escasez de oxígeno en la zona radicular.

El contenido de humedad en el suelo varía dependiendo de la profundidad de este, pero la mayor parte de dicho contenido se encuentra por lo general en la primera capa del suelo (Figura 8.41, la cual es la que representa la interacción entre el suelo y la atmósfera, y es la reguladora de los procesos de agua precipitada, infiltrada, de escorrentía, de evaporación y de transpiración, (Castro et al., 2011). Por otra parte, en la capa superficial se lleva a cabo el proceso de germinación de las semillas y el crecimiento de las plantas por lo que esta porción del suelo es de vital importancia para el desarrollo de los cultivos.

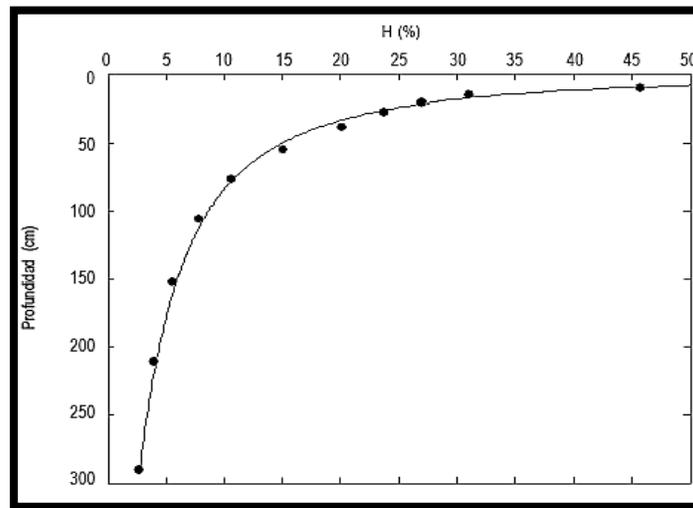


Figura 8.41 Curva de humedad en función de la profundidad para un suelo de textura franco-arenosa (Fuente: Nuñez et al., 2013)

Las propiedades físicas del suelo como: la textura, estructura, porosidad, consistencias del suelo, son los principales factores que determinan el grado de humedad que se almacena en el suelo, (Castro et al., 2011).

Existen diversos métodos y procedimientos para medir el contenido de humedad en el suelo. Los métodos se pueden clasificar según la naturaleza y principios utilizados en: métodos directos, que permiten medir directamente el contenido de agua en el suelo; y métodos indirectos, que se basan en la medida de alguna propiedad física del suelo dependiente del contenido de agua, (por ejemplo, la permitividad o constante dieléctrica relativa del suelo), (Florentino, 2006). Los principales métodos son:

Volumétrico. Es un método directo. Se toman muestras de suelo en el campo, se colocan en envases herméticamente cerrados y se trasladan al laboratorio; se pesan en húmedo, se colocan en estufa a 105 °C, mínimo por 24 h, hasta peso constante. El contenido de agua en el suelo es la cantidad de agua que es removida en la estufa, (Florentino, 2006). Los resultados se expresan como la masa de agua en relación a la masa de suelo o bien como el volumen de agua en relación al volumen de suelo.

Las principales ventajas y desventajas de este método según Florentino (2006) son:

Ventajas: Requiere de equipos comunes y poco costosos, no necesita calibración, es el método de referencia para la calibración de otros métodos y equipos.

Desventajas: No se puede repetir la misma observación en el mismo punto, las muestras son de poco tamaño, implica mucho trabajo, requiere relativamente de mucho tiempo para obtener los resultados, el procedimiento no es adecuado para suelos con alto contenido de materia orgánica, si se quiere expresar en fracción volumétrica, se requiere la determinación de la densidad aparente.

Sonda de neutrones: Es un método indirecto. Este instrumento, contiene una fuente radioactiva que envía una cierta cantidad de neutrones rápidos. Estos neutrones rápidos son aproximadamente del tamaño de un átomo de hidrógeno. Cuando los neutrones rápidos chocan contra los átomos de hidrógeno del agua, se vuelven más lentos. Un detector dentro de la sonda mide la proporción de los neutrones rápidos que salen y de los neutrones lentos que regresan. Esta relación se usa entonces para estimar el contenido de la humedad en el suelo, (Edward, 2010).

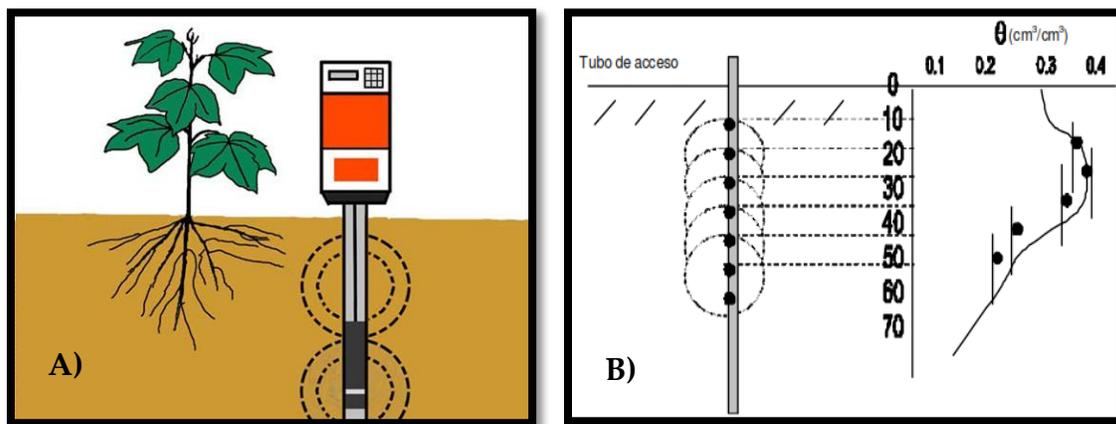


Figura 8.42 A) Diagrama de un indicador de humedad de neutrones (sonda de neutrones) (Fuente: Arizona Cooperative Extension, 2010); B) Perfil de humedad realizado con la sonda de neutrones (Fuente: Florentino, 2006).

Según Florentino (2006), las principales ventajas y desventajas de este método son:

Ventajas: Se pueden obtener rápidamente los resultados cuando ya se dispone de la curva de calibración; las mediciones se hacen directamente en campo en el mismo sitio y a la misma profundidad, lo cual permite determinar con mayor precisión los cambios de humedad en el suelo a través del tiempo y espacio; es muy sensible a cambios de humedad en el suelo; permite obtener información para la determinación de la conductividad hidráulica no saturada del suelo directamente en campo, junto con la información generada con tensiómetros.

Desventajas: El equipo es costoso; el operador está en contacto con una fuente radiactiva, necesita calibración para cada suelo en particular; puede ser afectado por la densidad aparente del suelo, por altos contenidos de Hidrogeno en otros constituyentes del suelo (arcillas y otros minerales) o por la presencia en altas concentraciones de otros elementos en el suelo que son moderadores de neutrones.

Resistencia Eléctrica. Es un método indirecto. Se basan en la propiedad que tienen algunos materiales porosos como el yeso, el nylon o la fibra de vidrio, de conducir la corriente eléctrica. Se introducen pequeños bloques de estos materiales en el suelo, con dos electrodos insertados en su interior, absorben agua en función del contenido de humedad del suelo, lo que da lugar a variaciones de la resistencia eléctrica. (Florentino, 2006). El contenido de humedad se puede determinar por la resistencia al paso de corriente eléctrica entre los dos electrodos en contacto con el suelo. Entre más agua exista en el suelo, más baja es la resistencia. Cuando los bloques están en equilibrio con el suelo, las terminales se conectan a un medidor y se toma la lectura, (Edward, 2010).

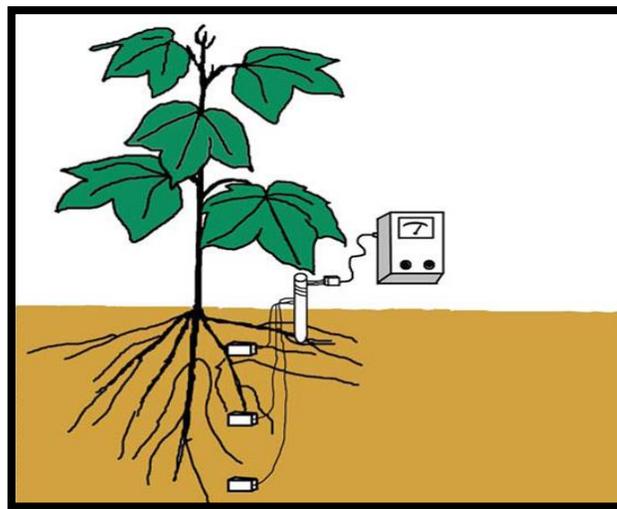


Figura 8.43 Diagrama de los bloques de resistencia (Fuente: Arizona Cooperative Extension, 2010).

Reflectómetros del dominio del tiempo (TDR). Es un método indirecto. Funcionan bajo el principio de que la presencia de agua en el suelo afecta la velocidad de propagación de una onda electromagnética (la hace más lenta). El TDR envía una onda electromagnética a través de una guía (generalmente un par de puntas paralelas de metal) colocada en el suelo a la profundidad deseada. El TDR mide el

tiempo que le toma a la onda viajar por la guía hacia el suelo y regresar. Este aparato registra el tiempo y lo convierte a una lectura de la humedad del suelo. Entre más mojado esté el suelo, más tiempo le toma a la onda magnética viajar por el suelo y regresar por la guía, (Edward, 2010).

Según florentino (2006), las principales ventajas y desventajas de este método son:

Ventajas: Permite medidas continuas; no se requiere calibración específica; solo en algunos casos; es muy preciso; se puede medir a cualquier profundidad en el perfil y en capas de suelo muy delgadas; puede medirse también la salinidad del suelo; no trabaja con fuente radiactiva; es poco influenciado por otras características del suelo como densidad aparente, textura, etc.

Desventajas: Relativamente costoso; aplicabilidad potencialmente limitada en suelos altamente salinos o en suelos arcillosos muy pesados; requiere calibración específica en algunas condiciones (Ej. suelos orgánicos y volcánicos), considera un pequeño volumen de suelo (alrededor del largo de las varillas).



Figura 8.44 Diferentes tipos de TDR (Fuente: Muñoz-Carpena, 2004).

Los métodos anteriormente mencionados sólo permiten controles puntuales, con un alcance espacial y temporal muy limitado. Por ello, se hace imprescindible la consideración de la información procedente de sensores remotos que cubren extensas superficies agrícolas y son capaces de estimar variables que muestran alta variabilidad, y permiten, asimismo, su aplicación directa a una escala adecuada.

La teledetección y la humedad del suelo

La teledetección es la obtención de información acerca de la tierra o de un objeto de interés (con sensores remotos), sin entrar en contacto con él, generalmente esta información se detecta y se mide en diversas partes (bandas) del espectro electromagnético, (Castro et al., 2011).

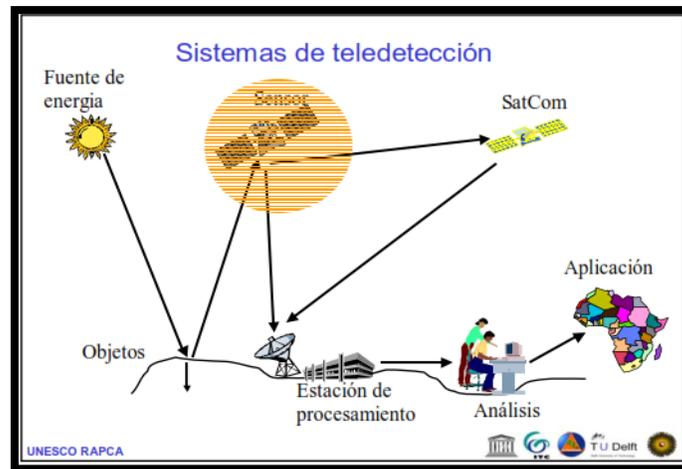


Figura 8.45 Partes que involucran la teledetección (Fuente: UNESCO, 2010).

Mientras instrumentos con base en la tierra pueden ser usados para obtener mediciones confiables de la humedad del suelo en lugares específicos, estos instrumentos no pueden ser usados para hacer mediciones en áreas grandes. Las observaciones por satélites desde el espacio pueden cubrir áreas amplias y proporcionan información que permite determinar la cantidad de agua contenida en el suelo, (NASA, 2015).

Existen muchos criterios para clasificar a los distintos tipos de sensores remotos. Según González Iturbe (2007), los más frecuentemente empleados son:

- A) Banda del espectro electromagnético utilizada. Los sensores se dividen en ultravioleta, del visible, del infrarrojo, de microondas, de frecuencia ultra alta (UHF), sensores de frecuencias muy altas (VHF).
- B) Fuente emisora. Los sensores se clasifican en pasivos (registran la energía emitida por otra fuente, y reflejada por los objetos) y activos (emiten energía en dirección al objeto y luego la detectan, como el radar).
- C) Ubicación espacial de la fuente emisora y receptora. En sensores monestáticos (como el radar) y biestáticos (fotografía aérea).

- D) Información registrada. Se clasifican en sensores fotográficos (cuando la información es registrada en una emulsión fotográfica al momento de ser recibida) y sensores no fotográficos (la información que recibe es proyectada sobre una pantalla).
- E) Mecanismos utilizados para captar la información. Los sensores se dividen en: }

Fotográficos. Operan con cámaras y películas.

- Electro-ópticos formadores de imagen. Pueden ser de tres tipos: de formato, barredores no oscilantes y barredores mecánicos. Los de formato (como los sistemas de TV). Los no oscilantes barren en una sola dirección, mientras que los mecánicos incluyen una gran variedad de sistemas de barrido.
- Electro-ópticos no formadores de imagen. No forman imagen a partir de la información captada, sino que produce curvas, grupos de números o números simples que caracterizan la energía electromagnética emitida y/o transmitida a través de una superficie o región del espacio.
- De microondas. Pueden ser activos o pasivos. Los activos formadores de imagen son los radares de visión lateral (SLAR) que pueden ser de antena real o de antena sintética (SAR). Los no formadores de imagen se clasifican en dispersómetros y radiómetros de microondas los cuales son pasivos.

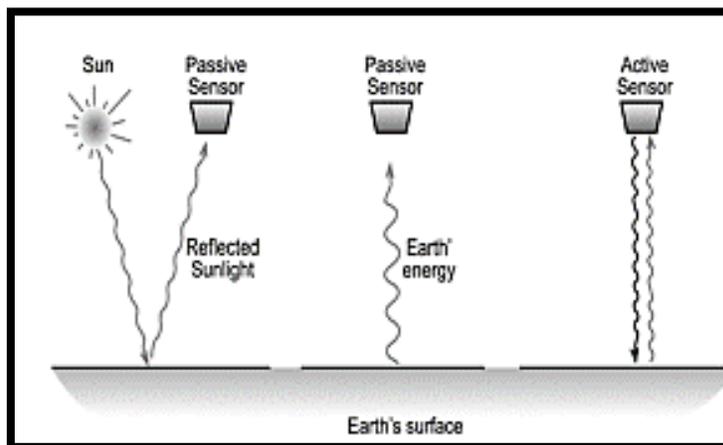


Figura 8.46 Esquema general de los sensores pasivos y activos (Fuente: UNESCO, 2010).

El análisis de la información generada por sensores de microondas es una alternativa que está alcanzando un gran desarrollo en los últimos tiempos. El procesamiento de imágenes de radar es una de las técnicas con mayor potencial en la actualidad para

el estudio de la distribución espacial y evolución temporal de la humedad del suelo, (Ceballos et al., 2004).

La Teledetección ofrece grandes posibilidades para la realización de progresos en varias áreas del conocimiento, aunque todavía no se ha logrado todo lo que de ella se esperaba debido a que se deben realizar perfeccionamientos en el nivel de resolución espacial, espectral y temporal de los datos. La teledetección es una técnica prometedora para aplicarse ampliamente a la agricultura y sobre todo al estudio del suelo permitiendo medir y obtener datos en forma amplia y precisa.

Determinación de la humedad del suelo con imágenes satelitales.

Con las imágenes satelitales es posible determinar el contenido de humedad en el suelo ya sea usando imágenes del infrarrojo térmico con el método de inercia térmica o bien con la combinación de bandas.

Inercia térmica (Imágenes del infrarrojo térmico): Es la propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que lo cede o absorbe. Representan la capacidad de un suelo a resistir cambios de temperatura, depende de la conductividad térmica y de la capacidad calorífica del suelo y es directamente proporcional a su contenido de humedad (cuando aumenta el contenido de agua del suelo, la inercia térmica aumenta proporcionalmente.). (Van De Griend et al., 1985).

El modelo puede ser escrito mediante la siguiente ecuación.

$$SMSI(t) = \frac{\theta(t) - \theta_{RES}}{\theta_{SAT} - \theta_{RES}} \quad (1)$$

$$SMSI_0(t) = \frac{ATI(t) - ATI_{MIN}}{ATI_{MAX} - ATI_{MIN}} \quad (2)$$

$$\theta(t) = SMSI_0(\theta_{SAT} - \theta_{RES}) + \theta_{RES} \quad (3)$$

Donde:

SMSI (t): Es índice de saturación de humedad en el tiempo (t).

SMSI₀ (t): Es el índice de saturación de humedad en la capa superior de la teledetección.

$\theta(t)$: es el contenido de humedad volumétrico contenido en el suelo en el tiempo t (m^3/m^3)

$\theta(RES)$: Es el volumen residual de humedad contenido en el suelo (m^3/m^3)

$\theta(SAT)$: Es el contenido volumétrico de saturación del suelo (m^3/m^3)

ATI (t): Es la inercia térmica aparente en el tiempo t (K^{-1})

ATI (Min): Es la mínima inercia termina aparente (K^{-1})

ATI (Max): Es la máxima inercia termina aparente (K^{-1})

Según Martinez(2006), las imágenes del infrarrojo térmico tienen una resolución espacial insuficiente para el análisis a pequeña escala y presentan el problema de la interferencia de la nubosidad. La capa de suelo de la que proporcionan información es demasiado fina como para realizar estimaciones del perfil completo del suelo.

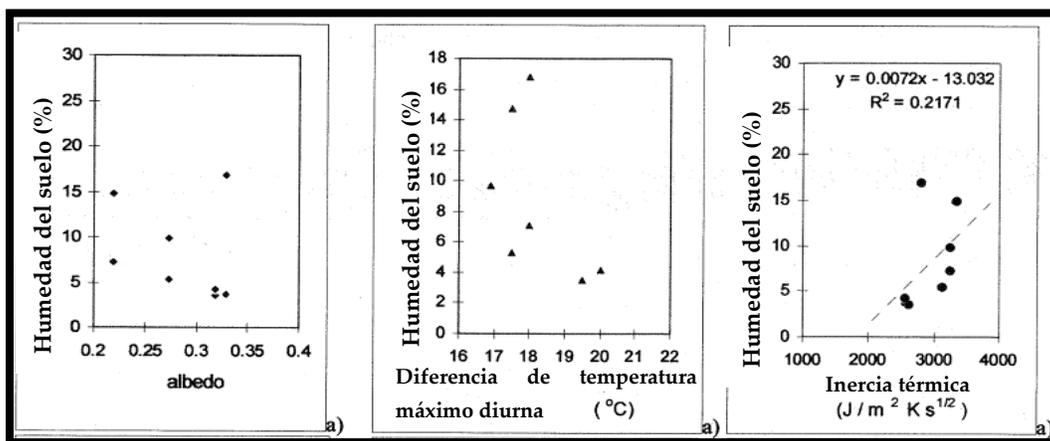


Figura 8.47 Relación entre albedo, diferencia de temperatura máxima diaria e inercia térmica y el contenido de humedad del suelo (Fuente: Hejmanonowska & Mularz, 1996).

Imágenes del satélite Landsat TM. Las imágenes pueden ser obtenidas de la página oficial de USGS Global Visualization Viewer, tienen una resolución de 30 m., con 3556 pixeles de ancho y 4116 líneas de longitud, con 7 bandas que van desde el espectro visible, así como el infrarrojo cercano, medio, termal y lejano.

Según Castro et al. (2011) para obtener la capa que permita identificar la humedad en el suelo se debe elaborar una imagen con la combinación de bandas 1, 2 y 5. De esta combinación de bandas de las imágenes satelitales se obtiene la mejor discriminación que permite observar la humedad del suelo. Sin embargo, esta combinación de bandas nos indica solamente si existen humedad o no suelos

desnudos o con poca cobertura vegetal, Figura 8.48. Para un mejor conocimiento de los suelos con humedad se debe identificar la vegetación densa.

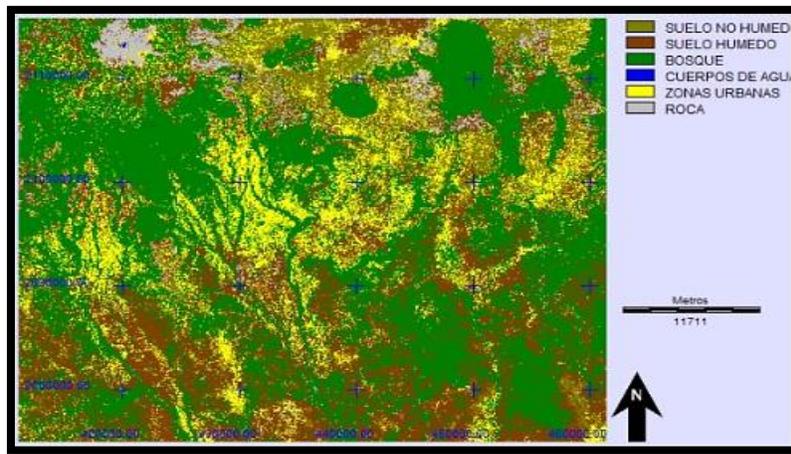


Figura 8.48 Mapas de diferentes coberturas identificando suelos húmedos (Castro et al. ,2011).

Castro et al. (2011) propone un método para obtener la discriminación de la humedad usando el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), en donde se debe realizar un Reclass para tener la vegetación como una sola cobertura, para ello se usa la siguiente expresión:

$$\text{Suelos con humedad} = \text{Reclas de suelos húmedos (Banda 1,2,5)} - \text{Reclas de vegetacion (NDVI)} \quad (4)$$

Dando como resultado una imagen con suelos con y sin humedad, Figura 8.49.

Determinación del contenido de humedad con el satélite SMAP

El satélite SMAP (Soil Moisture Active Passive), se lanzó el 31 de enero del 2015, en California y su objetivo principal será medir la humedad alojada en los suelos de la Tierra, una pequeña fracción del agua de la Tierra que tiene un efecto desproporcionadamente grande sobre las condiciones meteorológicas y también sobre la agricultura (NASA, 2015).

Las tres partes principales del satélite son: un radar, un radiómetro y una antena de malla giratoria. El radar (activo) y el radiómetro (pasivo) con un rango de radiofrecuencia de banda L (1.5 a 2.9 GHz), ambos con múltiples polarización.

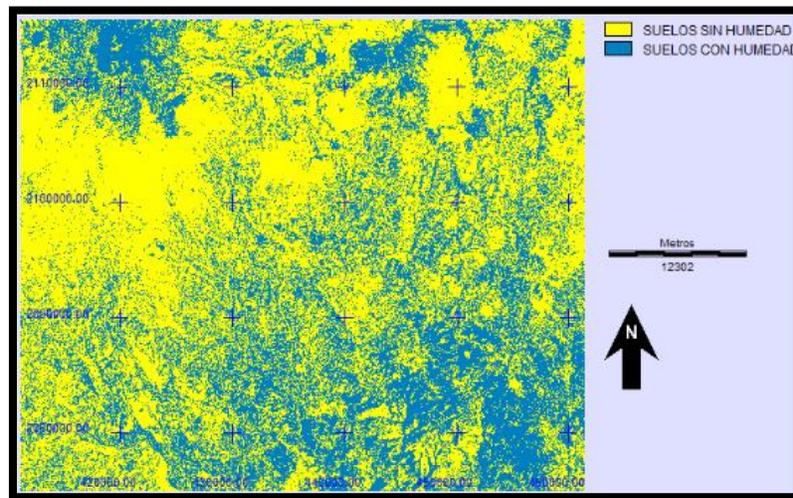


Figura 8.49 Mapas de Suelos húmedos (Fuente: Castro et al. 2011).

Las frecuencias de banda L permiten observaciones de la humedad del suelo a través de nubes y cubierta vegetal moderada durante el día y la noche. Múltiples polarizaciones permiten estimaciones precisas de humedad del suelo que se harán con correcciones sobre la vegetación, la rugosidad de la superficie, rotación Faraday (Ej. Interacción entre radiaciones electromagnéticas y el campo magnético de la tierra), y otros factores perturbadores. Ambos instrumentos han sido diseñados para mitigar la interferencia de radiofrecuencias, los cuales vienen de radares con base en la tierra y transmisión de microondas que pueden contaminar las mediciones de la banda L, (NASA, 2015).

La polarización u orientación (horizontal o vertical) de la onda emitida por el radar también puede recibirse de vuelta con polarización horizontal o vertical. De este modo aparecen cuatro 4 posibles combinaciones (HH, HV, VH, VV) que pueden utilizarse como si fueran cuatro bandas ya que contienen diferente tipo de información.

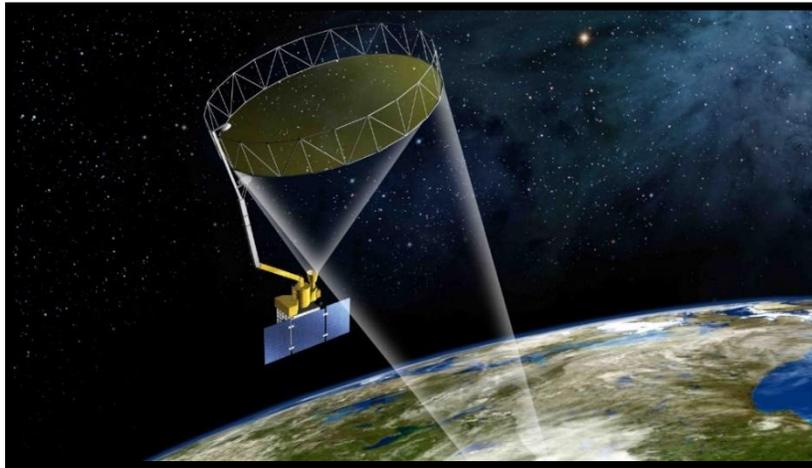


Figura 8.50 Concepto Artístico del Satélite SMAP (Fuente: NASA, 2015).

El radar del SMAP, utiliza la antena para transmitir las microondas hacia la Tierra y recibir las señales que regresan, lo cual se llama retrodifusión. Las microondas penetran unas pocas pulgadas o más en el suelo antes de rebotar, (NASA, 2015). Los cambios en las propiedades eléctricas de las microondas que regresan señalan cambios en la humedad del suelo y también dicen si el suelo está congelado o no. Mediante el uso de la técnica procesamiento de radar de apertura sintética, el radar puede producir imágenes muy nítidas con una resolución de uno a tres kilómetros.

El radiómetro mide la intensidad de la radiación por microondas emitidas por la superficie de la tierra para proporcionar estimaciones de la humedad del suelo. El radiómetro proporciona datos más precisos sobre la humedad del suelo pero genera una resolución más gruesa, de aproximadamente 40 kilómetros, (NASA, 2015).

Mediante la combinación de observaciones del radiómetro y el radar, se podrán proporcionar estimaciones de la humedad del suelo en los 5 primeros cm. con 9 km. de resolución espacial en 3 días entre series, excluyendo regiones de nieve y hielo, superficie congelado, áreas urbanas, vegetación densa; en un intervalo de 7 días se proporcionara el mapa global de la humedad del suelo, Figura 8.51, (NASA, 2015).

Según NASA (2015), los productos finales que se obtendrán del satélite SMAP se dividían en cuatro niveles los cuales son:

- Nivel 1. Los productos del nivel B y C son calibrados en base a la temperatura de brillo del radiómetro.

- Nivel 2. Hay tres productos de humedad del suelo, que resultan de los flujos de datos de radar y radiómetro. Los productos de salida son en régimen de media órbita.
- Nivel 3. Estos productos están compuestos de los datos diarios de la humedad superficial del suelo del nivel 2. El producto de la humedad del suelo del radiómetro se deriva de las mediciones de temperatura de brillo de este y se publica con resolución espacial de 36 km. El producto de la humedad del suelo solo del radar se publica con resolución de 3 km. L2_SM_AP es un producto de la una combinación activo y pasivo (radar y radiómetro) que produce estimaciones de humedad del suelo a las 9 km de resolución.
- Nivel 4. Son productos finales derivados de los modelos anteriores, las unidades de la humedad del suelo se reportan en volumen de agua en relación al volumen de suelo (cm^3/cm^3)

En el Cuadro 8.6 se observan los distintos productos que se obtendrán para llegar al mapa global de humedad del suelo:

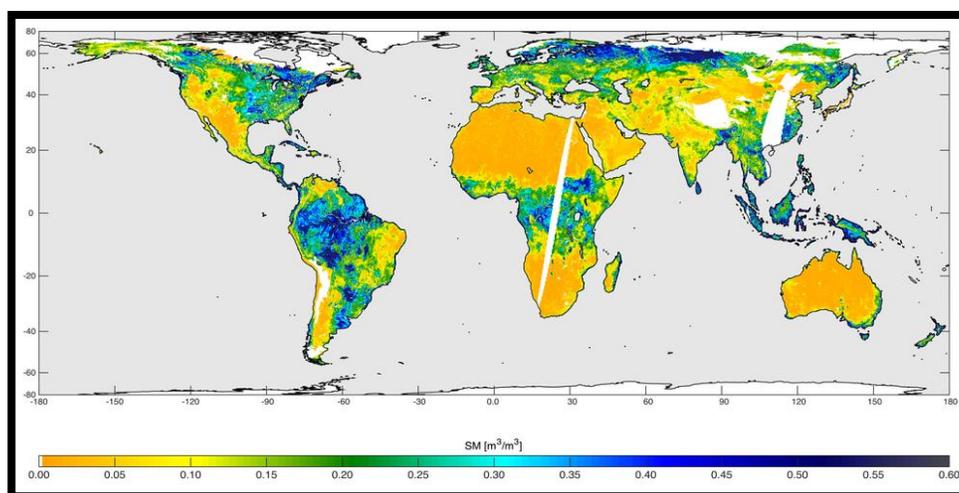


Figura 8.51 Mapa de Humedad del suelo, adquiridas entre el 04 de mayo y 11 de mayo de 2015, resolución de 5.6 millas (9 kilómetros) (Fuente: NASA / JPL-Caltech / GSFC, 2015).

Cuadro 8.6 Producto de datos obtenidos con SMAP (Fuente: NASA, 2015).

| Nombre corto del producto | Descripción corta | Resolución (km.) | Tiempo de adquisición |
|---------------------------|--|------------------|-----------------------|
| L1A_Radar | Datos en bruto del radar en orden cronológico | -- | 12 horas |
| L1A_Radiometro | Datos en bruto del radiómetro en orden cronológico | -- | 12 horas |
| L1B_S0_LoRES | Radar, baja resolución en orden cronológico | 5X30 | 12 horas |
| L1b_TB | Radiómetro, en orden cronológico | 36x47 | 12 horas |

| | | | |
|--------------|--|-----|----------|
| L1C_S0_HiRes | Radar, alta resolución en orden cronológico (media órbita, cuadrículado) | 1-3 | 12 horas |
| L1C_TB | Radiómetro en orden cronológico (media órbita, cuadrículado) | 36 | 12 horas |
| L2_SM_A | Humedad del suelo (radar, media órbita) | 3 | 24 horas |
| L2_SM_P | Humedad del suelo (radiómetro, media órbita) | 36 | 24 horas |
| L2_SM_AP | Humedad del suelo (radar/radiómetro, media órbita) | 9 | 24 horas |
| L3_FT_A | Estado congelado o no (radar, composición diaria) | 3 | 50 horas |
| L3_SM_A | Humedad del suelo (radar, composición diaria) | 3 | 50 horas |
| L3_SM_P | Humedad del suelo (radiómetro, composición diaria) | 36 | 50 horas |
| L3_SM_AP | Humedad del suelo (radar/radiómetro, composición diaria) | 9 | 50 horas |
| L4_SM | Humedad del suelo (en la superficie y zona radicular) | 9 | 7 días |
| L4_C | Intercambio neto del carbono al ecosistema | 9 | 14 días |

En la figura 8.52 se observa: A) nivel 2 (L2_SM_AP) y B) nivel 3 (L3_SM_AP) de la humedad del suelo; C) Nivel 3 del estado de agua en el suelo (Congelado o no) (L3_FT_A).

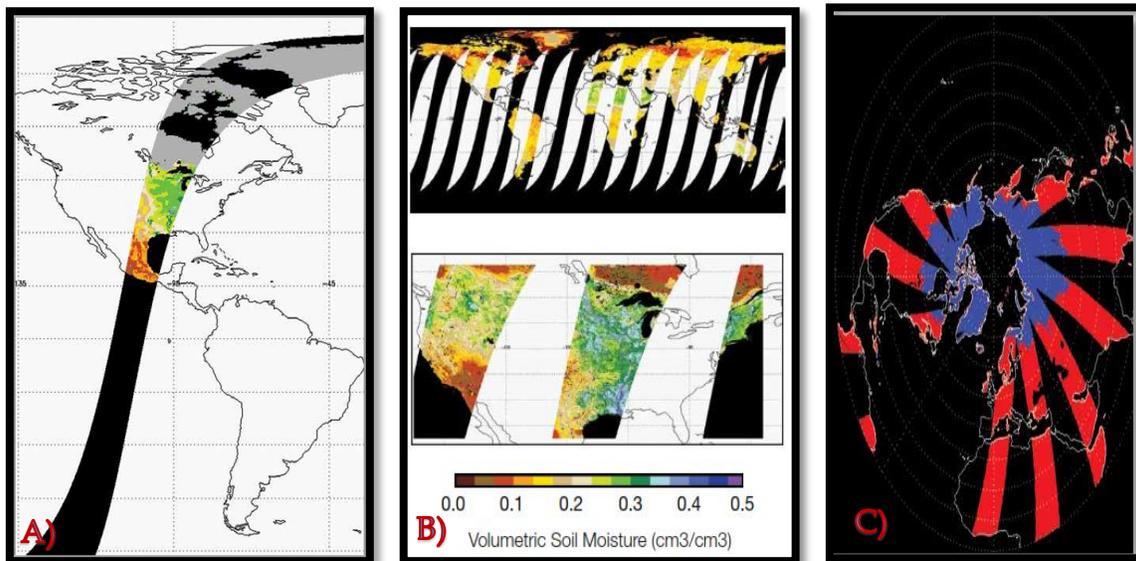


Figura 8.52 Simulación del producto A) nivel 2 y B) nivel 3 de la humedad del suelo; C) nivel 3 para estado del agua en el suelo (Congelado o no) (Fuente: NASA, 2015).

Las mediciones realizadas por el satélite SMAP servirán según la NASA (2015), en:

Cuadro 8.7 Aplicaciones probables y potenciales con la ayuda del satélite SMAP (Fuente: NASA, 2015).

| Área | Aplicación probable | Aplicación potencial |
|-----------------------------------|--|---|
| Meteorología | Mayor seguridad en el pronóstico meteorológico; predicciones de precipitaciones severas. | Mejoras regionales de predicción meteorológica. |
| Desastre naturales | Apoyo a las decisiones de alerta temprana de la sequía y deslizamientos de tierra; pronósticos de inundaciones. | Susceptibilidad al fuego; previsión de olas de calor. |
| Variabilidad del cambio climático | Capacidad del entendimiento del clima, vínculos entre el agua terrestre, la energía y los ciclos de carbono; flujos entre tierra/atmosfera. | Evaluación de riesgos a largo plazo. |
| Agricultura y Silvicultura | Predicciones de Producción agrícola, Alerta temprana de hambruna, seguimiento de la sequía agrícola. | Manejo del cultivo a escala parcelaria. |
| Salud humana | Panorama de la epidemiología, vigilancia de infestación de insectos. | El pronóstico de enfermedades y la mitigación de riesgos. |
| Ecología | Monitoreo de fuentes de carbono; previsiones de los ecosistemas; mejoras en el seguimiento de las relaciones de la vegetación y el agua en la tierra. | Monitoreo de humedales y de migración de aves. |
| Recurso Hídricos | Equilibrio regional y local del agua para una gestión más eficaz. | Monitoreo de la variabilidad de agua almacenada en lagos, embalses, pantanos y canales fluviales. |
| Recursos oceánicos | Mapeo de hielo en el mar para la navegación, especialmente en zonas costeras; cambios en la salinidad del agua. | Monitoreo de velocidad y dirección del viento del océano, en relación con la vigilancia de huracanes. |
| Inundaciones costeras | Monitoreo del nivel del mar. | Mapas de inundaciones costeras, monitoreo de los vientos en los océanos por huracanes. |
| Sequias | Apoyo a las decisiones de alerta temprana. | Identificación de la desertificación |
| Inundaciones | Mejora de las previsiones, en medianas y grandes cuencas hidrográficas; cartografía de las inundaciones; condiciones de infiltración del suelo; predicción de inundaciones causadas por ruptura de hielo | Predicción del impacto de las tormentas tropicales en la hidrología |
| La salud del ecosistema | Las mejoras en la vigilancia de la salud y cambio de la vegetación; dinámica de los ecosistemas | Monitoreo de humedales y migración de aves; Previsiones |

| | | |
|----------------------|--|--|
| | | de productividad forrajera de pastizales |
| Incendios forestales | Identificación de elementos potenciales de incendios | Identificación de elementos potenciales de incendios |

Las ventajas y desventajas que tienen los productos del satélite SMAP desde el punto de vista agrícola son:

Ventajas: Permite conocer el contenido de humedad en el suelo cada 7 días, permite monitorear zonas agrícolas extensas, permiten mejorar la planificación del riego, determinar rendimientos y monitorear la ocurrencia potencial de sequías, inundaciones y plagas.

Desventajas: La resolución espacial es muy gruesa.

Aplicaciones potenciales de la humedad en el suelo

Las principales aplicaciones de conocer el contenido de agua en el suelo son:

- Necesidades de agua de riego. La estimación del contenido de humedad de un suelo permite calcular la lámina de riego o la profundidad de mojado, así como definir el grado de estrés por déficit hídrico de los cultivos. Los niveles de humedad del suelo determinan el momento del riego.
- Zonas propensas a inundaciones. Conociendo la cantidad de agua que existe en el suelo y las precipitaciones que se puedan presentar en una zona, se determina el porcentaje del agua precipitada que puede infiltrar en el suelo y por tanto el porcentaje que puede escurrir.
- Infiltración. La cantidad de agua infiltrada puede calcularse mediante la relación que considera la precipitación pluvial diaria, la humedad disponible en el suelo al inicio del día y la máxima capacidad del almacenamiento del suelo.
- Escurrimientos. La detección de humedad de suelo a través de plataformas satelitales, se podrá aplicar en los modelos hidrológicos para escurrimientos y tránsitos de avenidas para estimar mejor los caudales escurridos y la correspondiente humedad disponible del suelo.

Conclusiones

Conocer el contenido de humedad en el suelo es de vital importancia para determinar el momento adecuado del riego, calcular escurrimientos, determinar zonas propensas a inundaciones, etc. Los métodos Gravimétricos, TDR, Resistencia eléctrica, sondas de neutrones, solo permiten mediciones puntuales del contenido de humedad en el suelo con alcance espacial y temporal muy limitado.

Con uso de los sensores remotos podemos determinar y monitorear el contenido de humedad en el suelo en áreas relativamente grandes, con el fin de obtener información que nos ayuden en una mejor gestión de los recursos hídricos. Las imágenes satelitales tanto de Landsat y SMAP permiten determinar el contenido de humedad en el suelo en la superficie; sin embargo, poseen resoluciones muy gruesas, lo cual hace muy difícil su aplicación a zonas agrícolas relativamente pequeñas.

Para tratar de contrarrestar la desventaja de la resolución gruesa de las imágenes satelitales se podría hacer uso de los Vehículos aéreos no tripulados (VANTs) los cuales permitirían proporcionar información que ayuden en el cálculo del contenido de humedad en el suelo a nivel parcelaria.

Referencias bibliográficas

- Organismo Internacional De Energia Atomica. (2003). *Sondas de neutrones y gamma: Sus aplicaciones en agronomía*. Vienna: OIEA.
- Castro Villegas, J. C., Balderas Plata, M. A., & Hernandez Tellez, M. (2011). Identificación de humedad en el suelo a través de la teledetección para el mejor manejo de la tierra: caso zona florícola, Estado de México. *Humedad del suelo con la teledetección*, (págs. 3-13). México.
- Ceballos Barbancho, A., Martínez Fernández, J., Casado Ledesma, S., Morán, T. C., & Hernández Santana, V. (2004). Estimación de la humedad del suelo a partir de la señal de radar (ERS-Scatterometer):. *Territorio y Medio Ambiente. Métodos Cuantitativos y Técnicas de Información Geográfica.*, págs. 177-189.
- Edward, M. (2010). Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego ¿Cuándo? *Arizona Cooperative Extension*, págs. 2-5.
- Florentino, A. (2006). Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. *Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo*, págs.50-57.

- González Iturbe Ahumada, J. A. (2007). Introducción a la percepción remota. En *técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (págs. 468-470). Mexico: UNAM.
- González Murillo, C. A. (2010). Raspa. En *Relacion Agua, Suelo, Planta, Atmosfera* (pág. 7). Bogota.
- Hassan-Esfahani, L., Torres Rua, A., Jensen, A., & McKee, M. (2015). Assessment of Surface Soil Moisture Using High-Resolution Multi-Spectral Imagery and Artificial Neural Networks . *Remote Sensing*, págs. 2627-2646.
- Hejmanonowska, B., & Mularz, S. (1996). Termal inertial modelling for soil moisture assessment based of remotely sensed data. *International Archives of photogrammetry and Remote sensing*, (pág. 283). Vienna.
- Martinez Fernandez, J. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. España: Universidad de Salamanca.
- NASA. (09 de 11 de 2015). Obtenido de NASA: <https://www.nasa.gov/>
- Nuñez, E. A., Ruiz, M., Chuk, D., & Rossini, B. (2013). Determinación de perfiles de humedad en suelos homogéneos a través de un método geoelectrico. *Ciencia del suelo*, págs. 276.
- Van De Griend, A., Camillo, P., & Gurney, R. (1985). Discrimination of Soil Physical Parameters, Thermal Inertia, and Soil Moisture from Diurnal Surface Temperature Fluctuations. *Water Resource Research*, págs. 997-1009.