

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Riego y Drenaje
Subcoordinación de Ingeniería de Riego



Informe Final

Proyecto RD1407.1

Drones y sistemas de información geográfica en la ingeniería hidroagrícola

Waldo Ojeda Bustamante (Jefe de proyecto)
Jorge Flores Velázquez
Helene K. Unland Weiss

Agosto 2014

Contenido

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. DESCRIPCIÓN DE LOS VANTS	6
2.1. HISTORIA DE LOS VANTS	6
2.2. DEFINICIÓN DE UN VANT O DRON	7
2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS VANTS.....	8
2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS VANTS	9
2.5. TIPOS DE VANTS.....	11
2.6. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UN VANT PARA APLICACIONES INGENIERILES	14
3. APLICACIONES DE LOS VANTS.....	18
3.1. EVOLUCIÓN DE LA APLICABILIDAD DE LOS VANTS.....	18
3.2. USOS CIVILES.....	18
3.3. CONSIDERACIONES GEODÉSICAS Y CARTOGRÁFICAS	20
3.4. SENSORES REMOTOS Y VANTS	30
3.5. USO DE VANTS EN LA AGRICULTURA	32
3.5.1. <i>Agricultura de precisión</i>	32
4. DRONES Y SIG EN LA INGENIERIA HIDROAGRICOLA.....	35
4.1. MONITOREO EN INGENIERÍA HIDROAGRÍCOLA	35
4.1.1. <i>Zonas de interés en Ingeniería Hidroagrícola</i>	35
4.1.2. <i>Estado fisiológico de los cultivos</i>	36
4.2. VANT PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN.....	39
4.3. ACTUACIÓN DE LOS VANT EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	40
4.4. EVALUACIÓN Y RENTABILIDAD SOBRE APLICACIONES DE LOS VANTS EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN.....	43
4.5. EXPERIENCIAS SOBRE APLICACIONES PRÁCTICAS:	44
4.5.1. <i>Sistema de Monitoreo</i>	44
4.5.2. <i>Uso de Sensores remotos</i>	48
4.6. APLICACIONES DE INTERÉS EN LAS ÁREAS DE RIEGO Y DRENAJE REPORTADAS EN LA LITERATURA	48
4.7. DESARROLLO TECNOLÓGICO DE UN VANT	59
4.7.1. <i>Agro Ingeniería del VANT</i>	62
4.7.2. <i>Oportunidades en el uso de VANT para México</i>	65
5. EQUIPOS COMERCIALES	68
5.1. MULTICOPTEROS	68
5.1.1. <i>AIBOTIX</i>	68
5.1.2. <i>Drone tools</i>	74
5.2. FUNCIONAMIENTO DE UN EQUIPO ALA	75
5.2.1. <i>El eBee</i>	75
5.2.2. <i>TRIMBLE_UXS</i>	76
5.3. PROGRAMAS (PÁGINAS WEB)	77
5.3.1. <i>MOSAIC</i> http://www.mosaicmill.com/index.html	77
5.3.2. <i>WWW.DRONEMAPPER.COM</i>	80
6. CONCLUSIONES	82

7. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS	84
8. BIBLIOGRAFÍA	85
8.1. LITERATURA CONSULTADA	85
8.2. LITERATURA CITADA.....	90
8.3. PÁGINAS EN INTERNET	92
8.4. PROGRAMAS	92
ANEXOS	93
ANEXO A. REQUERIMIENTOS PARA EL DESARROLLO DE UN PROYECTO	93
ANEXO B. ENTRENAMIENTO DEL OPERADOR.....	98
ANEXO C. DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS USANDO VANT	104

Índice de Figuras

Figura 2.1 Modelo de los primeros vehículos tripulados.	6
Figura 2.2 Clasificación de las plataformas UAS (US Department of Homeland Security . 10	
Figura 2.3 Tipos de VANT multicópteros (configuración del simulador de vuelo X-plane10).....	11
Figura 2.4 VANT tipo alas fijas.	12
Figura 2.5 VANT tipo avioneta.	12
Figura 2.6 De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha. Cada foto ilustra un VANT de las categorías indicadas en van Blyenburgh (2013): AeroVironment, EUA—Nano-Hummingbird; Ascending Technologies GmbH, Alemania—Falcon 8; CATUAV, España—Argos; Swiss UAV, Suiza—Neo s300; Schiebel, Austria—Camcopter S100; MMIST, Canadá—Snowgoose; Thales, UK—Watchkeeper; Selex ES, Italia—Nibbio; Insitu Inc., EUA—Integrator.	13
Figura 2.7 De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha. Cada foto ilustra un VANT de las categorías indicadas en van Blyenburgh (2013): General Atomics Aeronautical Systems, EUA—Predator A; QinetiQ, Inglaterra—Zephyr; Lockheed Martin, EUA—Morphing UAS.	14
Figura 2.8 Componentes de un VANT (Chao y Chen, 2012).	14
Figura 2.9 Componentes de un sistema de aviación no tripulado (SANT) (Chao y Chen, 2012).	15
Figura 2.10 Componentes de un procesador central de un Dron.....	16
Figura 3.1 Fotografía 1 obtenida del vuelo con el VANT.	21
Figura 3.2 Fotografía 2 obtenida del vuelo con el VANT.	21
Figura 3.3 Fotografía 3 obtenida del vuelo con el VANT.	22
Figura 3.4 Fotografía 4 obtenida del vuelo con el VANT.	22
Figura 3.5 Fotografía 5 obtenida del vuelo con el VANT.	23
Figura 3.6 Fotografía 6 obtenida del vuelo con el VANT.	23
Figura 3.7 Pantalla principal del programa ICE.	24
Figura 3.8 Mosaico generado mediante el programa ICE.	24
Figura 3.9 Mosaico obtenido de la integración de fotos.	25
Figura 3.10 Pantalla principal de programa QGIS.....	25
Figura 3.11 Activación de complementos para QGIS.	26
Figura 3.12 Cargar archivos de trabajo.....	26
Figura 3.13 Ejecución del Georreferenciador.	27
Figura 3.14 Selección del tipo de coordenadas.....	27
Figura 3.15 Cargar puntos de referencia.	28
Figura 3.16 Configuración de la transformación.	28
Figura 3.17 Sistema de referencia WGS 84 zona 14N.....	29
Figura 3.18 Ejecución de la georreferenciación.	29
Figura 3.19 Aerofotomosaico georreferenciado.....	30

Figura 3.20 Variación en la reflectancia de una parcela de papa en función de su estado de desarrollo y fertilización.....	31
Figura 3.21 VANT capaz de rociar pesticidas sobre un viñedo (KenGiles/UC Davis) [King, R. 2013].....	33
Figura 4.1 Zonas de interés de la ingeniería hidroagrícola.	35
Figura 4.2 El ciclo de gestión en una zona de riego.....	36
Figura 4.3 Imagen tomada por un VANT de una zona cultivada.....	37
Figura 4.4 Detalle de un VANT equipada con cámaras espectrales para monitoreo del estado hídrico de parcela (https://adalidda.com/en/jobs/agricultural-drones-jobs).....	37
Figura 4.5 Ejemplo de imágenes multiespectrales captadas por un VANT (Anderson, 2014).	38
Figura 4.6 VANT tipo helicóptero sobrevolando campo de trigo en un área problemática con plaga (Kay Ledbetter, Nov. 2013).	38
Figura 4.7 Discretización de la superficie con fines de aplicación de insumos (ASABE, 2014)	39
Figura 4.8 Planeación del vuelo con un dron de ala.....	40
Figura 4.9 Aplicación diferencial del grado de labranza en la agricultura de precisión.....	41
Figura 4.10 Aplicación manual de pesticidas.....	42
Figura 4.11 Aplicación local de compensador de frío para favorecer la yema apical en vid.	43
Figura 4.12 Un dron vuela sobre un viñedo para determinar la condición de la uva (Sami Sarkis/Corbis).....	47
Figura 4.13 El nuevo pasatiempo para el protector de animales (www.pentacatalogg.com).	48
Figura 4.14 Zona de estudio.....	49
Figura 4.15 Resultados en azul de la zona detectada con terrazas.....	50
Figura 4.16 Plataforma de monitoreo usada.....	50
Figura 4.17 a) VANT usado y (b) vista de cuatro cámaras CMOS integradas.	51
Figura 4.18 Sensitividad espectral contrastante de las cuatro bandas asociadas a las cámaras del VANT usado.	51
Figura 4.19 Microdrone MD4-1000 volando sobre la zona de estudio.	52
Figura 4.20 Imagen obtenida a 10 m de altura y la imagen procesada después del proceso de clasificación de vegetación.....	52
Figura 4.21 VANT en misión de monitoreo de un viñedo (Johnson <i>et al.</i> , 2003).....	53
Figura 4.22 Etapas del estudio para calibrar modelo para estimar el Kc.	54
Figura 4.23 Ejemplo de resultados obtenidos (Kc y h) con el procesamiento de imágenes.	54
Figura 4.24 Mapa NDVI en Pseudocolor de una parcela de pasto en tres fechas para el año 2007.....	55
Figura 4.25 Rutas de vuelos usados (este-oeste y norte sur) para asegurar gran traslape de imágenes.	55
Figura 4.26 Escena tridimensional generada con métodos de foto-reconstrucción usando plataformas basadas en VANTs.....	56

Figura 4.27 Foto-reconstrucción de un simple 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....	56
Figura 4.28 VANT usado para la aplicación precisa de agroquímicos (A) equipo de bombeo de pesticidas; (B) caja de controlador.	57
Figura 4.29 Imágenes aéreas adquiridas con un aeroplano (izquierda) y un VANT (derecha) con árboles sanos (H) e infectados con HLB (D).	58
Figura 4.30 Imágenes segmentadas en falso color de un árbol sano (a) e infectado (b). Las imágenes de la izquierda fueron obtenidas con un aeroplano y las de la derecha con un VANT.	58
Figura 4.31 Imágenes adquiridas con VANTs en falso color e imágenes con características espectrales significativas de árboles sanos e infectados.	59
Figura 4.32 Portal web de servicios en fotografía y videos aéreos mediante el uso de VANT.	60
Figura 4.33 Imagen tomada desde un VANT tipo Octocopter.	62
Figura 4.34 Trayectoria circular simulada con las velocidades en un plano (u, w) en m/s para los datos mostrados en el cuadro 4.1, y en eje vertical la velocidad angular en rad/s.	65
Figura 4.35 Izquierda: Telemaster tipo avioneta; Derecha: Hoverfly, Multicoptero con tecnología Scripta (Hoverfly Technologies).	67
Figura 5.1 Portal AIBOTIX. (www.aibotix.com).	68
Figura 5.2 Diversidad de aplicaciones para los VANTs.	69
Figura 5.3 Aplicaciones de lo VANT en desastres y prevención de riesgos. (www.aibotix.com).	70
Figura 5.4 VANT modelo X6 V2 AIBOT. (www.aibotix.com).	70
Figura 5.5 Características principales del X6 V2 AIBOT. (www.aibotix.com)	71
Figura 5.6 Aplicaciones del X6 AIBOT a través de varios sensores. (www.aibotix.com)	71
Figura 5.7 Cámaras multiespectrales. (www.aibotix.com).	72
Figura 5.8 Análisis del cultivo a través de imágenes multiespectrales.	72
Figura 5.9 Componentes básicos de un VANT.	73
Figura 5.10 El TAYZU 720 Quadcopter mostrado en la exhibición CES 2015.	73
Figura 5.11 Hexacoptero para aplicaciones agrícolas de la empresa Drone Tools	75
Figura 5.12 Equipo eBee.	76
Figura 5.13 Trimble_ UXS con sistema de despegue.	77
Figura 5.14 Portafolio de servicios en línea (www.enzomosaic.com)	77
Figura 5.15 Etapas para la obtención de índices de vegetación (www.enzomosaic.com) ...	78
Figura 5.16 Índices de vegetación como resultado de las imágenes (www.enzomosaic.com)	79
Figura 5.17 Control del riego mediante VANTs (www.enzomosaic.com)	79
Figura 5.18 Servicios ingenieriles usando VANTs. (www.dronemapper.com)	80
Figura 5.19 Productos que ofrece Dronemapper. (www.dronemapper.com)	81
Figura B.1 Menú de ajustes del simulador de vuelo	100
Figura B.2 Ubicación espacial del vehículo	100

Figura B.3 Manejo del vehículo en el simulador.....	101
Figura B.4 Modos de vuelo para el simulador.	101
Figura B.5 Flying-model-simulator.....	102
Figura B.6 Controles del vehículo en FMS.....	102
Figura B.7 Manejo del vehículo en el simulador.....	103

Índice de Cuadros

Cuadro 2.1 Beneficio de los VANTs frente a los aviones tripulados (Díaz, 2013)	9
Cuadro 2.2 Ejemplos de VANTs equipados con sensores remotos (van Blyenburgh, 2013).	13
Cuadro 3.1 Aplicaciones civiles de los Vehículos Aéreos no Tripulados.....	19
Cuadro 4.1 Valores de referencia sin considerar la rotación.....	64
Cuadro A.1 Propósito: uso de VANT para realizar agricultura de precisión	94

DRONES Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA INGENIERÍA HIDROAGRÍCOLA

RESUMEN

El monitoreo de variables del sistema agua-suelo-planta-atmósfera, 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 se generan, 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. Sin embargo, el monitoreo remoto de variables hidroagrícolas ha sido una necesidad en continua evaluación y mejora ante los altos costos que representa su adquisición manual.

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 drones, son una alternativa actual para estimar variables de interés hidroagrícola en forma remota. Ante el desarrollo que presentan los vehículos aéreo no tripulado, es de interés para el IMTA conocer las principales características y componentes de los drones más utilizados con fines agrícolas, en particular para las diferentes áreas de interés de la Coordinación de Riego y Drenaje, en particular en Ingeniería de Riego, Drenaje y Contaminación Agrícola, Operación y Mantenimiento de Infraestructura Hidroagrícola, y Conservación de Cuencas y Tecnología Forestal.

Mediante el tratamiento de imágenes obtenidas por los VANTs, el IMTA puede contar con las herramientas tecnológicas para obtener información de las parcelas, cultivos, suelos, de la infraestructura hidroagrícola, etc. Es el especial interés del IMTA contar con una plataforma práctica, confiable y económica para fortalecer la ejecución de proyectos en las áreas de planeación, operación, administración y evaluación de las zonas de riego del país.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la tecnología ha impactado en la mayoría de los sectores productivos, lo que a su vez ha traído nuevas alternativas para mejora de procesos y tareas productivas que durante un tiempo permanecieron en espera de esta evolución o mejora. El uso de máquinas continuamente se robotiza, y el hombre las ocupa para monitorear, supervisar y controlar procesos productivos, en campos que involucran toma de decisiones e inteligencia artificial. Los robots no solo han invadido las labores asociadas a las tareas del hombre a nivel terrestre, sino que ha sido posible hacer nuevos avances en la parte aérea apoyada en la inteligencia artificial para planear, navegar y evadir obstáculos de una forma segura y confiable.

Las actividades agrícolas demandan información relacionada con su planeación, administración, gestión, y evaluación, para aplicar los insumos de manera óptima, usar los recursos de manera racional, y realizar ajustes en las políticas públicas. 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).

En México, la producción agrícola de cada año agrícola son estimados a partir de datos de campo bajo responsabilidad de las entidades oficiales como la Secretaria de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) a través del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2013), sin embargo estos métodos son poco confiables y representan un alto costo para el gobierno dada la extensión y gran variabilidad en las características de los sistemas agrícolas del país. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) también tiene como responsabilidad la estimación de las superficies cultivadas y cosechadas de los Distritos y Unidades de Riego (DR y UR) así como de los Distritos de Temporal Tecnificado (DTT) de los ciclos agrícolas de un año agrícola, con el objetivo de incrementar la confiabilidad de los datos obtenidos en campo y así mejorar la planificación y asignación de recursos.

El IMTA recurrentemente realiza estimaciones de superficies y producción agrícola mediante encuestas en campo y muestreos aleatorios para los principales cultivos del país durante el desarrollo de un año agrícola. Algunas veces este proceso ha sido apoyado por sensores remotos como satélites, equipados con cámaras multiespectrales.

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 tecnologías de sensores remotos, que ha mejorado los métodos para análisis, procesamiento y despliegue de información espacial de las 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 métodos que utilizan datos de sensores remotos proveniente de satélites se han utilizado con éxito en otros países como Brasil, Estados Unidos, Argentina y Canadá para estimar la superficie agrícola, y a pesar de que dependen de los datos obtenidos en campo para su validación, han demostrado ser más precisos y confiables.

El monitoreo detallado de zona agrícolas, bajo una agricultura intensiva, requiere de imágenes de alta resolución (con tamaño de pixel menor de 1 metro), acceso a bandas espectrales térmicas, del infrarrojo cercano y visible, y el uso de anchos de banda que permite la estimación de parámetros biofísicos clave de los cultivos como concentración de clorofila, agua, materia seca, índice de área foliar, y temperatura. La disponibilidad de imágenes durante las etapas fenológicas críticas es de gran importancia con fines de predicción de cosecha y estrés de los cultivos.

Los métodos más usados para monitorear el estado fisiológico de los cultivos usando sensores remotos dependen de la estimación del índice de verdor, calculado a partir de imágenes espectrales: visible e infrarrojo cercano. Este índice está relacionado a la estructura de follaje, pero es insensitivo a los procesos fisiológicos o la concentración de los pigmentos fotosintéticos. Investigaciones recientes indican que la transpiración y la conductancia estomatal de las hojas están asociadas a la emisión termal del follaje, y de la absorción de la luz de los pigmentos fotosintéticos y no fotosintéticos.

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. El uso de VANTs facilita el monitoreo frecuente de parámetros de cultivos que actualmente tiene restricciones a través de sensores satelitales. Varios investigadores han reportado que el uso de sensores espectrales miniaturizados de bajo costo puede suministrar de información similar a aquellos de tamaño normal localizadas en vehículos aéreos tripulados.

Un dron o un vehículo aéreo no tripulado como normalmente se traduce del inglés de *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, es sin duda una herramienta que tiene una gran cantidad de aplicaciones, por eso debido a la diversidad de usos que estos equipos móviles presenta, es también llamado *Unmanned Aerial System (UAS)* es decir, un sistema aéreo no tripulado. De acuerdo al sector donde se usa o aplica, puede recibir distintos nombres. Para usos civiles, ya sea como esparcimiento o para una actividad científica es muy común llamarlo simplemente como VANT, es decir, un Vehículo Aéreo No Tripulado, o simplemente como *drone* o dron como es llamado en aplicaciones militares.

Aunque los VANTs nacieron principalmente para aplicaciones militares, actualmente son utilizados en una diversidad de aplicaciones civiles para obtener productos cartográficos de pequeña escala, y de ahí se desprende un amplio rango de productos y aplicaciones de adquisición remota de imágenes y videos. Las aplicaciones en agricultura también son

diversas, y las necesidades actuales perfilan esta herramienta con gran potencial para actividades de planeación, monitoreo y control, tales como labores de lucha contra incendios o seguridad civil, vigilancia de infraestructura hidráulica, etcétera.

La actualidad en ciencia y tecnología tiene actividades de riesgo en los cuales los vehículos aéreos no tripulados suelen ser preferidos para misiones que son demasiado "aburridas, sucias, peligrosas o costosas" para los aviones tripulados.

Ante la necesidad de aplicar nuevas herramientas tecnológicas como los vehículos aéreos no tripulados (VANT), el IMTA requiere del conocimiento de las aplicaciones potenciales de los drones en las áreas de riego y drenaje. Los vehículos aéreos no tripulados han sido estudiados y aplicados en el mundo desde hace más de 25 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 de interés para las actividades asociadas al riego y drenaje.

La selección del VANT generalmente está asociado con los requerimientos de su uso y aplicación y desde luego los correspondientes costos. La Coordinación de Riego y Drenaje del IMTA sustenta su objetivo inicial en el desarrollo de una línea de investigación sobre la aplicación de esta herramienta en el ámbito agrícola en la programación, operación, evaluación, y supervisión de zonas de riego.

Sin duda el uso de VANT representa ventajas, sin embargo también se pueden mencionar sus principales inconvenientes:

- Disponibilidad de información escasa y dispersa
- Tiempo de respuesta
- Costo

En la etapa inicial del proyecto, para el año 2014 el IMTA pretende adquirir un VANT con los siguientes fines a corto plazo:

- Determinación del estrés hídrico del cultivo, mediante índices de vegetación.
- Estimación de superficies establecidas en zonas de riego
- Seguimiento remoto de la aplicación del riego
- Teledetección de zonas erosionadas.

En este sentido, los principales requerimientos para el uso y manejo de drones con fines agrícolas son los siguientes:

1. Energía-Tiempo de vuelo. Si se considera una velocidad de vuelo de 50 km hr^{-1} , entonces es necesario un tiempo de vuelo de al menos una hora para trabajos de largo alcance, para Distritos de Riego de estas dimensiones, o mayor si la

conducción de canales pueda superar longitudes de 50 km. Para aplicaciones parcelarias, 15-20 minutos son suficientes.

2. Para colocar la cámara adecuadamente, es necesario que un VANT cuente con :
 - a. dispositivos electrónicos para seguimiento posicional
 - b. metodologías muy específicas para la adquisición de imágenes y videos.
3. Procesamiento y análisis. Es una necesidad contar con software y equipo para el procesamiento y análisis de grandes volúmenes de imágenes y videos.
4. Fuente de energía.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS VANTs

2.1. Historia de los VANTs

La historia de los VANTs se remonta a mediados del siglo XIX, cuando se desarrolló un primitivo VANT formado por un globo cargado de bombas que se utilizó el 22 de agosto de 1849 en un ataque austríaco a la ciudad de Venecia. Posteriormente aparecieron los aviones radio-controlados utilizados para entrenar a los tiradores británicos antiaéreos durante la Segunda Guerra Mundial.

En el año de 1863, el inventor Charles Perley patentó un bombardero no tripulado. Este bombardero consistía en un globo aerostático de aire caliente que podía cargar con explosivos y tenía un temporizador que permitía la liberación de las bombas bajo ciertas condiciones, considerando la velocidad del viento y la distancia se ajustaba el temporizador. Este primitivo dispositivo no generó los resultados esperados, ya que el viento cambiaba de dirección y su velocidad, por lo que tenía una precisión mínima. Aunque la idea estaba bien fundada, el sistema completo necesitaba más información.

Aun cuando, el primer vuelo tripulado en América fue el 17 de diciembre de 1903, llevado a cabo por los hermanos Wright (**Figura 2.1**), antes ya se habían realizado vuelos no tripulados. El primer vuelo tripulado usando un planeador sin motor se realizó en 1891, cerca de Potsdam, Alemania por Otto Lilienthal asistido por su hermano Gustav. En 1883, un británico llamado Douglas Archibald tomó unas fotografías desde una cometa o papalote. Douglas Archibald había estado experimentando con cometas y el viento durante muchos años.



Figura 2.1 Modelo de los primeros vehículos tripulados.

Los VANTs modernos comienzan su historia el 4 de mayo de 1924, cuando el ingeniero francés de la École Centrale Paris Étienne Oehmichen (1884-1955) construyó un helicóptero compuesto de cuatro rotores con despegue vertical. Los vehículos aéreos comenzaron su desarrollo desde la primera Guerra Mundial y marcó un hito durante la Segunda Guerra Mundial con el lanzamiento de los vehículos

alemanes V1 y V2. Si bien su utilización tuvo en un principio fines militares, en la actualidad se viene empleando en aplicaciones civiles de vigilancia, control, fotogrametría, intervención en accidentes y catástrofes, cine, conservación del medio ambiente, agricultura, y una gran cantidad de aplicaciones no militares. Como caso especial para la utilización de recursos fotográficos apareció en 1980 un sistema que se utilizó para el monitoreo en la construcción del monoriel de Wuppertal en Alemania.

En aquellos tiempos, por supuesto, no estaban disponibles los modelos auto-pilotados con tecnologías GPS/INS (Global Positioning System/Inertial Navigation Systems), ni tampoco los equipos fotográficos de cámaras digitales. Desde entonces ha ido evolucionando el desarrollo de muchas mejoras en los sistemas VANT y se ha logrado aumentar la potencia de los mismos, generando así más tecnologías con plataformas diversas y de propulsión, utilización de cámaras digitales con integración de GPS y de INS para el vuelo autónomo y consiguiendo que los estabilizadores generen un preciso direccionamiento del VANT. De esta forma se aumenta la calidad de las imágenes y servicios que se consigue con la utilización de los VANT en forma rápida y económica.

2.2. Definición de un VANT o Dron

Un VANT es un equipo para la obtención de datos remotos desde el entorno aéreo, con una estructura normalmente de fibra de carbono, y utilizado para la toma de fotos y videos en alta resolución incluso más allá del alcance visual mediante vuelo FPV (“First Person View” o “vuelo en primera persona”). Según la utilización de los VANTs se les integran diferentes tipos de cámaras o equipos de información para la gestión de la información que se recoja desde los vuelos que se realicen. También para la gestión de los equipos se utilizan diferentes sistemas de comunicación para el envío y recepción de los elementos de vuelo y de los datos capturados.

Los VANTs realizan una misión o actividad sin tener tripulación a bordo, ya que el control del mismo se realiza desde tierra ya sea por medio de un controlador o de forma autónoma.

En general un VANT, UAS, UAV o dron, es una aeronave acondicionada para colocar dispositivos auxiliares operados a distancia (control remoto) o que pueden ser pre-programados para fines diversos, desde levantamientos cartográficos hasta reconocimientos de patrones terrestres o medición remota de propiedades o variables de interés de la superficie terrestre.

Para distinguir un VANT de otros tipos de dispositivos no tripulados, como los misiles; se define al VANT como un vehículo sin tripulación reutilizable, capaz de mantener un nivel de vuelo controlado y sostenido. Puede ser propulsado por un motor de explosión o de reacción, capaz de ser alimentado por energía eléctrica, o combustible.

Hay una amplia variedad de formas, tamaños, configuraciones y características en el diseño. Históricamente los VANT eran simplemente aviones de control remoto, pero con mayor frecuencia se está empleando el control autónomo. En este sentido se han creado dos variantes: algunos son controlados desde una ubicación remota, y otros vuelan de forma autónoma sobre la base de planes de vuelo pre-programados, usando sistemas más complejos de automatización dinámica.

Cabe destacar que las aeronaves controladas remotamente en realidad no pueden ser llamadas VANTs, ya que los vehículos aéreos pilotados remotamente (o por control remoto) se conocen como Aeronaves Radio-Controladas o Aeronaves R/C. En contraste, los VANTs son sistemas autónomos que adicionalmente pueden operar sin intervención humana alguna durante su funcionamiento en la misión a la que se haya encomendado, es decir, pueden despegar, volar y aterrizar automáticamente dado un programa de vuelo predefinido que incluye una trayectoria tridimensional y una serie de acciones para toma de videos o imágenes en puntos de interés de su trayectoria.

2.3. Ventajas y desventajas de los VANTs

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 lo cual permite la realización de estudios espacio-temporales.

Las principales desventajas de los VANTs son:

- Dependen de una estación de seguimiento en tierra.
- Vulnerabilidad a varios factores ambientales, aves, aviones, redes electricas, entre otros.
- 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 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 2.1** se hace una comparación entre las aeronaves tripuladas y no tripuladas para usos similares.

Cuadro 2.1 Beneficio de los VANTs frente a los aviones tripulados (Díaz, 2013)

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

2.4. Clasificación de los VANTs

Los VANTs dependiendo su misión principal suelen ser clasificados en seis grandes tipos:

1. De blanco - sirven para simular aviones o ataques enemigos en los sistemas de defensa de tierra o aire.
2. Reconocimiento - enviando información militar. Entre estos destacan los MUAVs (Micro Unmanned Aerial Vehicle).
3. Combate (UCAV) - Combatiendo y llevando a cabo misiones que suelen ser muy peligrosas.
4. Logística - Diseñados para llevar carga.
5. Investigación y desarrollo - En ellos se prueban e investigan los sistemas en desarrollo.
6. UAV comerciales y civiles - Son diseñados para propósitos civiles.

En la **Figura 2.2** se muestran las nomenclaturas comúnmente utilizadas en base a descripciones militares para las plataformas UAS, tomando en cuenta los tamaños, la autonomía del vuelo y las capacidades.

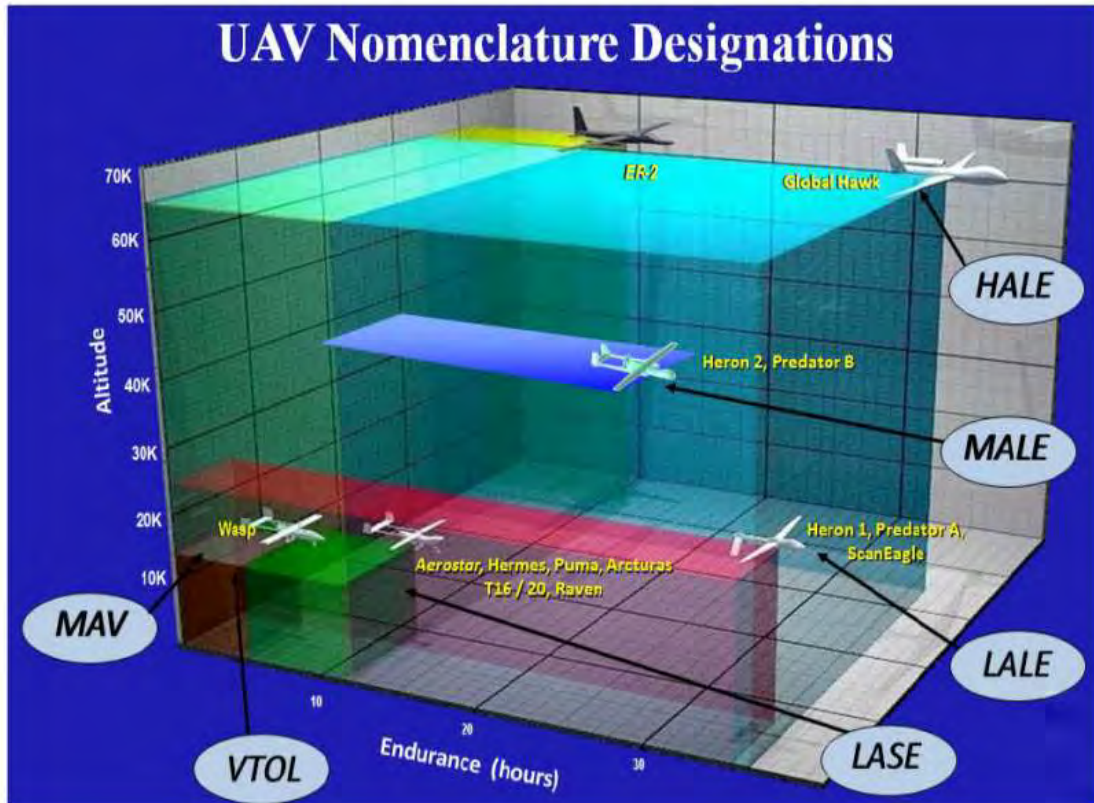


Figura 2.2 Clasificación de las plataformas UAS (US Department of Homeland Security [Polsky, 2004]). Nota la escala vertical está dada en pies.

También pueden ser categorizados dependiendo de su techo (altura) y alcance máximo:

- Handheld. Aproximadamente 600 m de altitud, unos 2 km de alcance.
- Close. Aproximadamente 1,500 m de altitud, hasta 10 km de alcance.
- NATO. Aproximadamente 3,000 m de altitud, hasta 50 km de alcance.
- Tactical. Aproximadamente 5,500 m de altitud, hasta 160 km de alcance.
- MALE (medium altitude, long endurance) hasta 9,200 m de altitud (aprox) y un alcance de unos 200 km.
- HALE (high altitude, long endurance) sobre 9,200 m de techo (aprox) y alcance indeterminado.
- HYPERSONIC alta velocidad, supersónico (Mach 1-5) o hipersónico (Mach 5+) unos 15.200 m de altitud o altitud suborbital, alcance de 200 km.
- ORBITAL en orbitas bajas terrestres (Mach 25+).
- CIS Lunar viaja entre la Luna y la Tierra.



Figura 2.4 VANT tipo alas fijas.

iii. Avionetas: entre los factores que definen la selección de un VANT o una avioneta tripulada, sin duda es el costo. Pero también deben atenderse aspectos técnicos relacionados con el objeto de la misión y la calidad del producto. Es indispensable saber y evaluar para que se requiere un VANT, que producto se va a obtener y no descuidar la parte operativa, en cuanto al manejo, operación y mantenimiento. En la **Figura 2.5** se muestra un ejemplo de un VANT tipo avioneta.



Figura 2.5 VANT tipo avioneta.

En el **Cuadro 2.2** se presentan las características generales de los VANTs equipados con sensores remotos de acuerdo a van Blyenburgh (2013). En las Figuras 2.6 y 2.7 se presentan en forma fotográfica los VANTs del Cuadro 2.2.

Cuadro 2.2 Ejemplos de VANTs equipados con sensores remotos (van Blyenburgh, 2013).

Nombre	Fabricante	Peso (Kg)	Resistencia (h)	Carga util (i) o Carga por peso (w)
Vehiculos aereo no tripulado – Ala fija				
SwingletCAM	SenseFly	0.5	0.5	(i) Camara RGB 16 Mpx
GeoScan101	GeoScan	2	1	(i) Camara RGB 24.3 Mpx
UX5	Trimble	2.5	0.83	(i) Camara RGB MILC 16.1 Mpx
Pteryx	FotoMapy	5	2	(w) w/o baterias de 1Kg
Sirius I	MAVinci	3	0.91	(i) Camara RGB 16 Mpx
Kahu	Skycam	4	2	(i) Camaras de doble cabeza RGB MILC 16 Mpx
Vehiculos aereo no tripulado – Ala rotatoria				
Geocopter	IGI	90	2	(w) 30 Kg
Scout BI – 100	Aeroscout	75	1.5	(w) 30 Kg
R-MAX, tipo II	Yamaha	100	1	(w) 28 Kg
Vehiculos aereo no tripulado – Multi-motores				
Md4 – 1000	Microdrones	3	1.46	1.2 Kg
HT-8-2000	Height-Tech	2.4	0.28	2 Kg
Aibot x6	Aibotix	2.4	30	2.5 Kg
Falcon 8	Ascending technologies	1.45	0.33	0.75 Kg
HexaKopter	MikroKopter	1.2	0.6	1 Kg.



Figura 2.6 De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha. Cada foto ilustra un VANT de las categorías indicadas en van Blyenburgh (2013): AeroVironment, EUA—Nano-Hummingbird; Ascending Technologies GmbH, Alemania—Falcon 8; CATUAV, España—Argos; Swiss UAV, Suiza—Neo s300; Schiebel, Austria—Camcopter S100; MMIST, Canadá—Snowgoose; Thales, UK—Watchkeeper; Selex ES, Italia—Nibbio; Insitu Inc., EUA—Integrator.



Figura 2.7 De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha. Cada foto ilustra un VANT de las categorías indicadas en van Blyenburgh (2013): General Atomics Aeronautical Systems, EUA—Predator A; QinetiQ, Inglaterra—Zephyr; Lockheed Martin, EUA—Morphing UAS.

2.6. Características generales de un VANT para aplicaciones ingenieriles

Un VANT de acuerdo a Chao y Chen (2012) tiene tres elementos principales: vehículo aéreo, sensores y actuadores. Como se presenta en la **Figura 2.8**, las funciones principales de un VANT típico son: movilidad, cálculos, toma de decisiones, comunicación y monitoreo/actuación. La mayoría de los VANTs tienen un procesador de alta capacidad para coordinar las funciones y toma de decisiones en función de la información colectada por sus sensores o de otros VANTs cercanos.

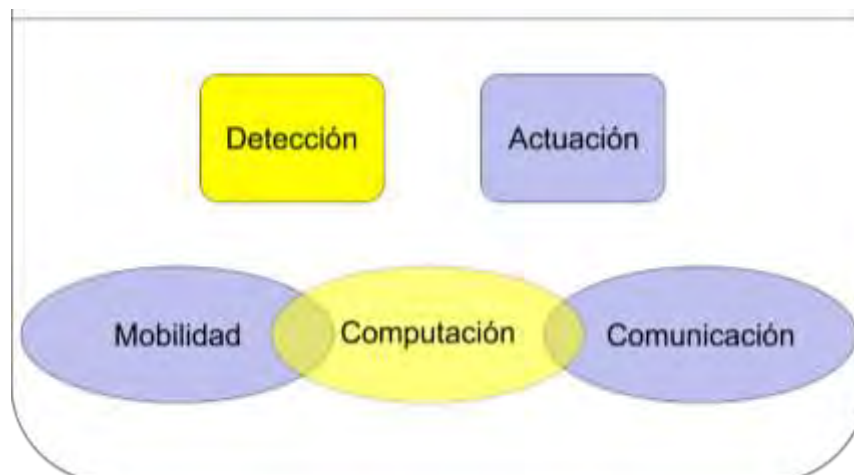


Figura 2.8 Componentes de un VANT (Chao y Chen, 2012).

En términos estrictos un VANT (en inglés UAV) es parte de un sistema SANT (cuyas siglas en inglés son UAS para indicar Unmanned Aircraft System). De acuerdo a Chao y Chen (2012), un sistema de aviación no tripulado (SANT) consta de los tres elementos principales como se muestra en la **Figura 2.9**:

a. **Equipo VANT** que consta de:

- i. Autopiloto. Un autopiloto es un sistema micro-electromecánico usado para guiar al VANT sin asistencia de un operador humano, consiste tanto de hardware como de software de soporte.
- ii. Fuselaje (estructura). La estructura del VANT es donde todos los dispositivos son montados incluyendo la propia estructura.
- iii. Carga útil. Es la carga del VANT que pueden ser cámaras de diferentes bandas espectrales u otros dispositivos de emisión como LIDAR, para funciones de inteligencia, reconocimiento o supervisión.
- iv. Subsistema de comunicación. La mayoría de los VANTs cuentan con más de un enlace inalámbrico. Por ejemplo, enlace RC para pilotaje seguro, WiFi de enlace para compartir datos, y enlace de datos para monitoreo terrestre.

b. Estación de control terrestre. Esta estación se usa para monitoreo y ajuste de la misión en tiempo real.

c. Dispositivos de despegue y aterrizaje. Varios VANTs requieren de dispositivos especiales para despegue como lanzador hidráulico o redes para aterrizaje.

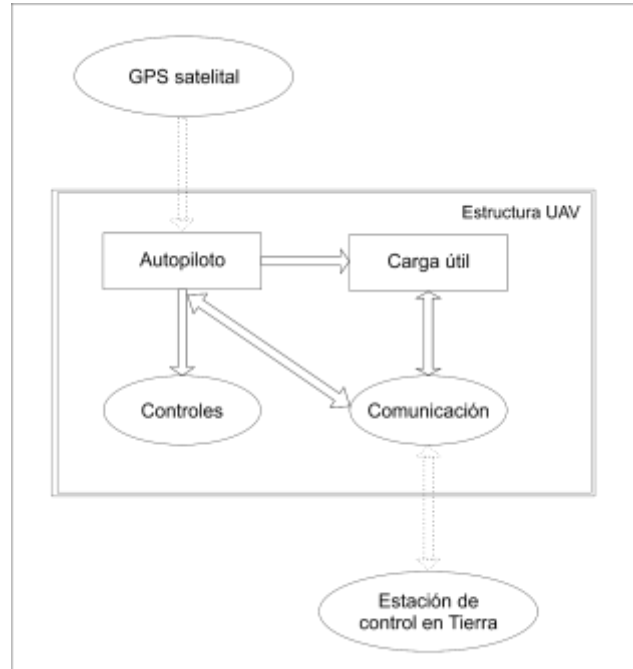


Figura 2.9 Componentes de un sistema de aviación no tripulado (SANT) (Chao y Chen, 2012).

El corazón de un VANT es un procesador central (PC), el cual tiene la función de enlazarse por un transmisor a la PC (micro-piloto), tiene también la posibilidad de navegar mediante

un sistema GPS, completamente independiente, puede hacer el despegue y aterrizaje de manera independiente. El mismo circuito tiene la capacidad de desarrollar muchas actividades, como mantenerse horizontal, etc.

El acelerómetro, giróscopo y sistemas de giro se les puede adherir muchos sensores, como el sonar, programable vía inalámbrica, con la finalidad de evitar el choque. En la operación, se pueden presentar inconvenientes con la batería, en la cual la carga eléctrica se conduce un dispositivo de distribución, y se distribuye en amperios para cada dispositivo de control electrónico de velocidad (electronic speed control), este transmite una orden que le llega de un plan de vuelo, desde la PC a un motor y de ahí a las hélices, en caso de los multicopteros. Para las avionetas o los aviones de alas fijas, la cámara o el sensor se coloca en un FIMBAL, con el fin de que mantenga una posición, relativamente independiente del movimiento del dron.

El procesador central se conecta con un transmisor y con este se tiene comunicación con tierra como se muestra en la **Figura 2.10**

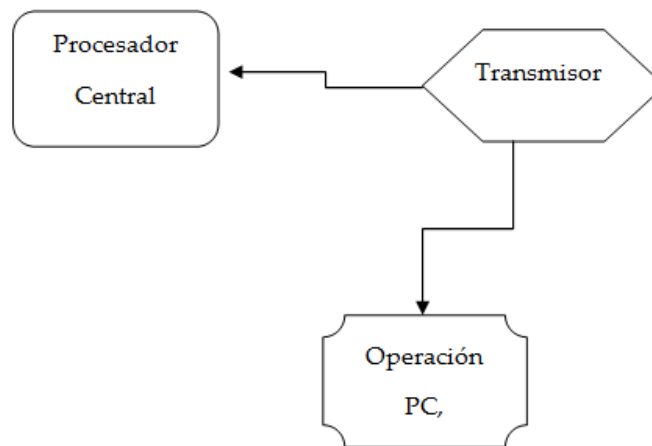


Figura 2.10 Componentes de un procesador central de un Dron.

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

- i. Posición. Longitud, latitud, y altura
- ii. Velocidad en tres ejes (x, y, z)
- iii. Tasa de giro
- iv. Aceleración (a_x, a_y, a_z)
- v. 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), ya que el pilotaje puede realizarse en navegación autónoma reemplazando al

piloto humano. 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, a medida que un sensor se miniaturiza, su costo aumenta y su resolución disminuye.

3. APLICACIONES DE LOS VANTs

3.1. Evolución de la aplicabilidad de los VANTS

Los drones fueron inicialmente concebidos para aplicaciones militares, sin embargo su uso se ha extendido y con ello la necesidad de adaptación en forma, tamaño, configuraciones y características en el diseño.

Si bien los VANTs eran simplemente aviones piloteados remotamente, sin embargo ahora con mayor frecuencia se controlan en forma autónoma. En este sentido se han creado dos variantes: algunos son controlados desde una ubicación remota, y otros vuelan de forma autónoma sobre la base de planes de vuelo pre-programados usando sistemas más complejos de automatización dinámica.

Las características reológicas del material de construcción del VANT dependen en gran medida del alcance y su uso. Se requiere material anticorrosivo si se pretende trabajar en ambientes de alta toxicidad química y radiológicos en desastres tipo Chernóbil. De bajo peso donde sea necesario tomar muestras con alto peligro de vidas humanas y realizar tareas de control de ambiente.

Los VANTs deben ajustarse a las normas regulatorias establecidas en el Tratado de Cielos Abiertos de 1992 que permiten los vuelos de VANTs, sobre todo el espacio aéreo de sus signatarios. Con ellos, pueden cooperar en misiones de control del narcotráfico y contra el terrorismo. Al igual podrían grabar vídeos de alta calidad para ser empleados como medios de prueba en un juicio internacional.

3.2. Usos civiles

Uno de los VANTs más usados es el tipo multicóptero, el cual puede ser usado para eventos más urgentes como recabar información previa y planeación, ya que los aviones no tripulados tiene la posibilidad de volar a muy bajas velocidades de ser necesario, lo que permite obtener imágenes. Si bien los drones eran para aplicaciones militares y de seguridad pública, ahora destacan los usos de protección civil, de ecología y de monitoreo de obra pública.

Se reporta el uso de VANTs para detectar plagas en bosques, algo que era difícil de detectar a nivel de suelo. La detección de plagas ha sido una actividad muy importante en el manejo de sistema de producción agropecuaria y forestal. Otro uso muy interesante de los VANTS es la revisión y seguimiento de la obra pública. Al momento de cotizar el avance de obra, o el cobro por obra terminada, será interesante poder visualizar en tiempo

"casi real" lo que se está construyendo, una carretera, edificio, presa, canal, etc., y poder apreciar visualmente el avance de obra, con un mosaico de fotos.

En protección civil, previo a la temporada de lluvias frecuentemente se elaboran mapas de riesgo. En esta vertiente los VANTs se están usando para revisar año con año los cauces, para lo cual las agencias de protección civil utilizan los VANTs para hacer un mapeo y así localizar nuevos puntos de riesgo como construcciones ilegales y basura.

Los VANTs hoy en día no solo se utilizan en el sector militar también son usados en aplicaciones civiles como el caso de la agricultura y el medio ambiente. El desarrollo de esta tecnología ha aumentado exponencialmente en los últimos años en todo el mundo, ya que los usos de los VANTs son muy numerosos. Los más importantes se presentan en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 Aplicaciones civiles de los Vehículos Aéreos no Tripulados.

Área	Aplicación
La fotografía aérea.	Cine, vídeo, aun así, etc.
Agricultura	Vigilancia de los cultivos y fumigación, vigilancia de ganado
Guardacostas	Búsqueda y rescate marino, vigilancia de costas.
Conservación	Vigilancia de la contaminación y de la tierra.
Aduanas e Impuestos Especiales	Vigilancia de las importaciones ilegales.
Las compañías eléctricas	Inspección de líneas eléctricas.
Servicios de Bomberos y la silvicultura	Detección de incendios, control de incidentes.
Pesca	Protección de la Pesca.
Compañías petroleras	Supervisión de equipo e infraestructura, tierra y seguridad de tuberías, tomas clandestinas.
Servicios de información	Noticias, información y fotografías, imágenes, por ejemplo grado de afectación, nivel de siniestros, población afectada.
Botes salvavidas	Investigación de incidentes, la orientación y el control.
Autoridades municipales	Monitoreo de eventos, seguimiento de desastres, catastro
Servicios meteorológicos	El muestreo y análisis de la atmósfera para la previsión, etc.
Agencias de tráfico	Seguimiento y control del tráfico, zonas de embotellamiento.
Servicio Oficial de Cartografía	La fotografía aérea para el mapeo.
Autoridades policiales	Búsqueda de falta de vigilancia las personas, la seguridad y el incidente.
Autoridades Ríos	Control de supervisión de los cursos de agua y el nivel, las inundaciones y la contaminación.
Organizaciones de la encuesta	Encuesta geográfica, geológica y arqueológica.
Juntas de Agua	Monitoreo de fuentes y red de distribución.

3.3 Consideraciones geodésicas y cartográficas

Con el uso de VANT se pueden generar productos cartográficos y mapas descriptivos detallados. Esto permite que los usuarios puedan sobreponer otro tipo de datos, y en función de ello, realizar actividades de planeación, adecuando datos históricos, para hacer proyecciones. Específicamente en ingeniería de riego, utilizando una proyección cartográfica generada de un VANT, se pueda proyectar zonas de riego y generar mapas de productividad de cultivos, reduciendo tiempos y costos de ejecución.

Una proyección cartográfica depende de las dimensiones, a nivel local no es necesario, pero para grandes levantamientos, es necesario considerar el sistema de coordenadas. El sistema de referencia usado es con base a un geoide, uno de los más conocidos es el WGS84 (World Geodeisc System). En México se generó el modelo geoidal MEX97, es el datum (punto de referencia) local usado para georeferenciar. El elipsoide es una figura geométrica basada en una elipse en rotación. La elipse WGS84 es mundial. En México usualmente se utilizan 3 referencias, el geoide más el elipsoide, nos da el datum: el North American Datum NAD1927, referenciado a Clarke 1866, y el NAD 1983, con el elipsoide GRS80.

El tipo de coordenadas usadas en México son UTM, y solo se trabaja en la zona de 11-16, meridiano central, 87° que corresponda a la zona comprendida entre 90° y 84° de longitud. Para levantamientos topográficos, se prefiere fijar un sistema de coordenadas ficticias y de ahí hacer las correcciones, estas coordenadas ficticias pueden ser:

- Falso este 500,000 metros
- Falso norte 0 metros
- Factor de convergencia 0.9996

Para la condiciones del IMTA usualmente se requiere una superficie de trabajo de 25 km² o más. La imagen satélite pasiva ha sido la mejor opción para áreas extensas. Sin embargo, un VANT es sin duda opción potencial para áreas pequeñas (menos de un km²) en términos de tiempo y de costo.

Para el trabajo colaborativo de VANT en grandes superficies, por ejemplo 20 km por 20 km, se usa un programa de estratificación en función de X parámetro, y se complementa con un VANT por cada sub-área.

Para usar VANT es necesario resolver la temporalidad, por ejemplo eliminar sombras pueden ser un inconveniente. Los inconvenientes de la fotografía aérea donde existe permanentemente nubosidad, se puede resolver con el uso de un VANT es una forma de solucionar dicho problema.

El costo de fotografías aéreas es aproximadamente de 20 USD por km², usando VANT puede costar desde \$150/ha dependiendo de la aplicación y escala.

La exactitud posicional es de 10 cm a 2.5 m, y pueden ser tomadas en blanco y negro y a color verdadero.

Como ejemplo de aplicación de un sistema VANT, primeramente se requiere definir un plan de vuelo para obtener una serie de seis fotos como las que se muestran a continuación (**Figuras 3.1-3.6**):



Figura 3.1 Fotografía 1 obtenida del vuelo con el VANT.



Figura 3.2 Fotografía 2 obtenida del vuelo con el VANT.



Figura 3.3 Fotografía 3 obtenida del vuelo con el VANT.



Figura 3.4 Fotografía 4 obtenida del vuelo con el VANT.



Figura 3.5 Fotografía 5 obtenida del vuelo con el VANT.



Figura 3.6 Fotografía 6 obtenida del vuelo con el VANT.

Independiente del número de fotos que se tomaron en el vuelo con el VANT, utilizando un paquete computacional (en este caso se utilizó el software Microsoft Image Composite Editor), se genera un mosaico integrado. En la **Figura 3.7** se muestra el ambiente general del software mencionado (ICE). Para generar un nuevo mosaico se usa el menú “file” – “new panorama”, y seleccionamos las imágenes obtenidas del vuelo con el VANT.



Figura 3.7 Pantalla principal del programa ICE.

El software procesa las imágenes proporcionadas y genera el mosaico (**Figura 3.8**), de la serie de fotos obtenidas durante el trayecto de vuelo del VANT. El mosaico resultante se puede exportar en diversos tipos de archivos, seleccionando el más conveniente a utilizar.

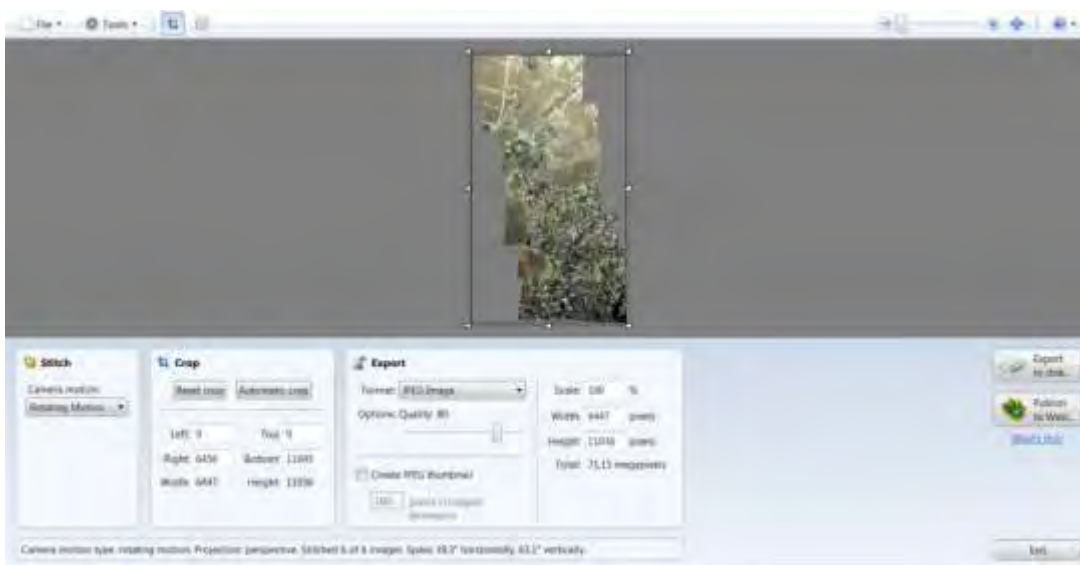


Figura 3.8 Mosaico generado mediante el programa ICE.

El mosaico generado (**Figura 3.9**) permite realizar actividades de fotoidentificación. La precisión puede variar metros pero se es posible observar rasgos característicos de interés.



Figura 3.9 Mosaico obtenido de la integración de fotos.

Es posible georreferenciar al mosaico generado mediante puntos de control, para lo cual se utilizan paquetes computacionales, por ejemplo el programa de cómputo Quantum GIS versión 2.2, el cual es un software de uso libre. En la **Figura 3.10** observamos el ambiente general del programa Quantum GIS.

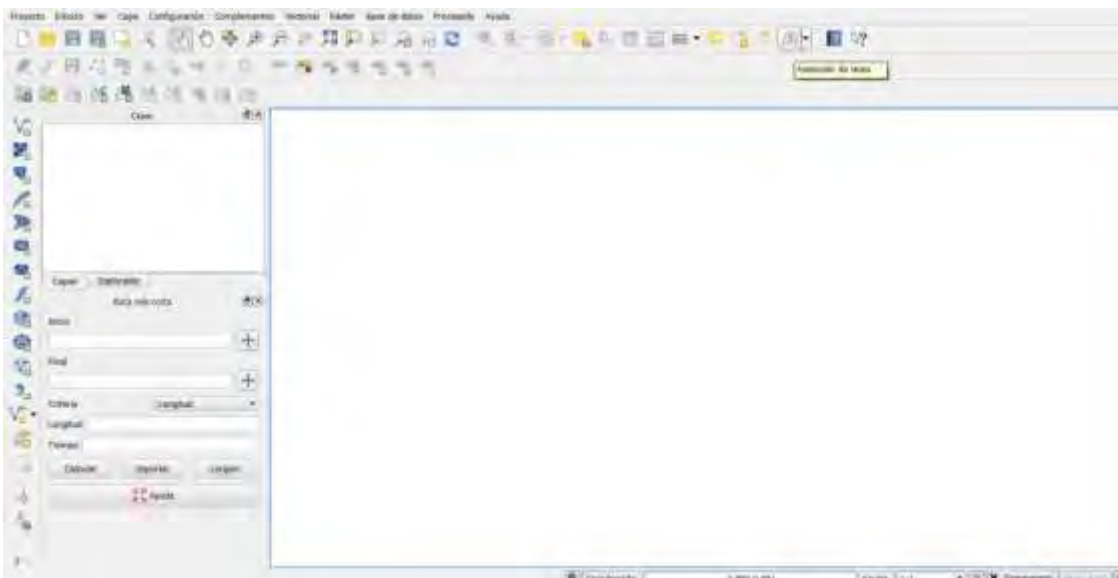


Figura 3.10 Pantalla principal de programa QGIS.

Muchas veces es necesario activar un complemento (**Figura 3.11**), que permita realizar la georreferenciación del mosaico utilizando una utilería. Usualmente esta tarea está incluida en un sistema de información geográfica. Para esto se ingresa al menú “complementos” – “administrar e instalar complementos”, y se activa el complemento “Georreferenciador GDAL”.

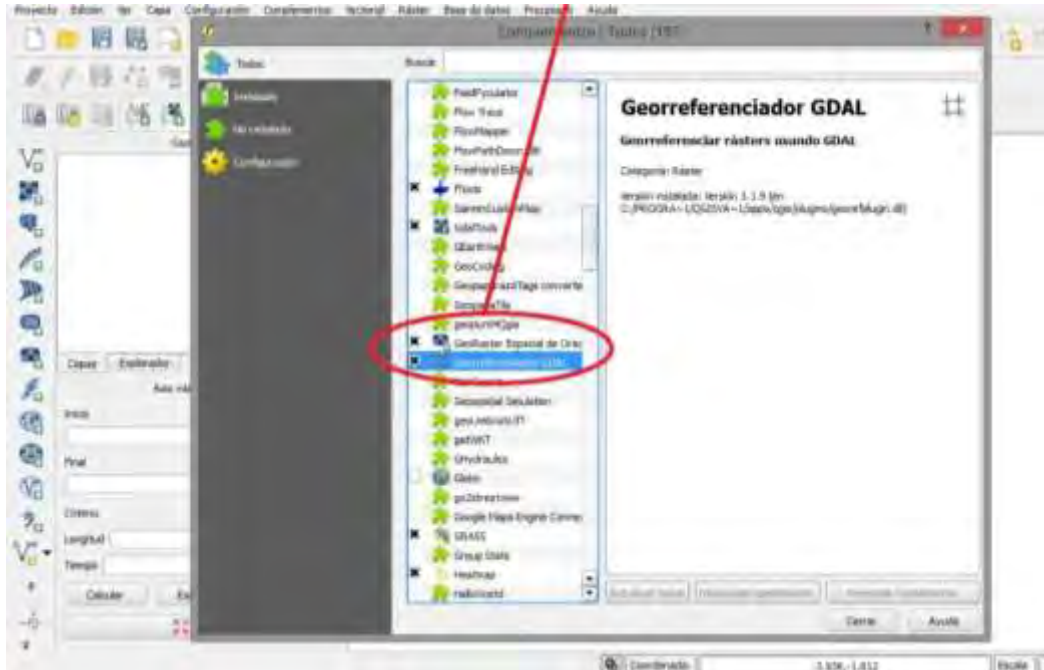


Figura 3.11 Activación de complementos para QGIS.

En la pantalla principal de QGIS se abre el archivo con el cual se desea trabajar (**Figura 3.12**).

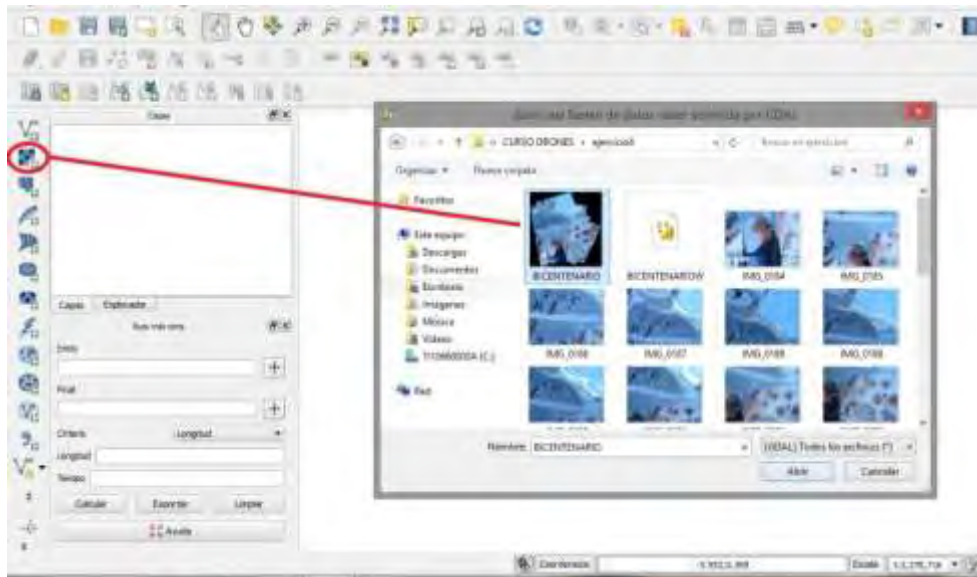


Figura 3.12 Cargar archivos de trabajo.

Una vez que se tienen disponibles los complementos requeridos y se ha cargado el archivo de trabajo, se ingresa al menú "Ráster" - "Georeferenciador" como se muestra en la **Figura 3.13**. Una vez dentro se vuelve a cargar el archivo anterior.

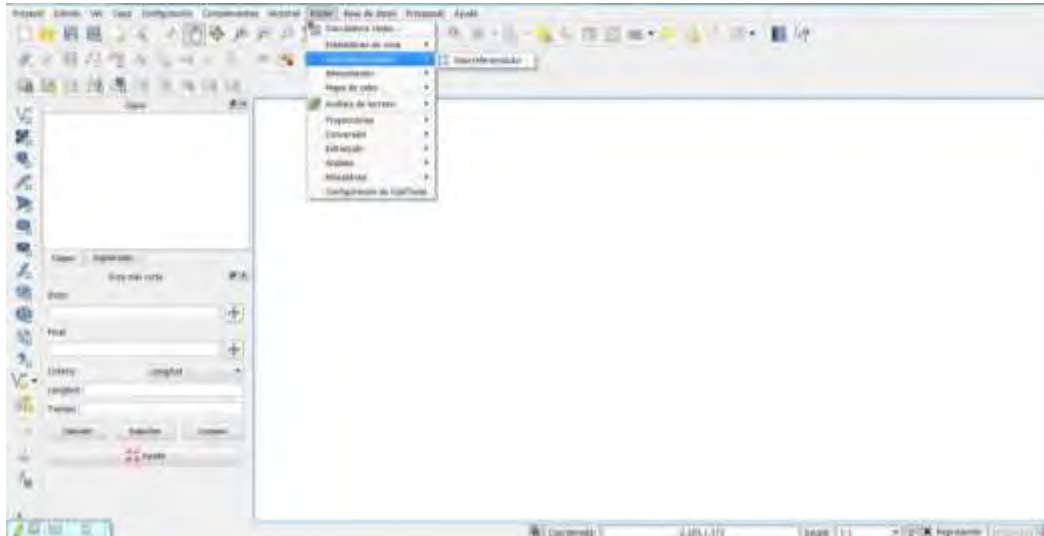


Figura 3.13 Ejecución del Georreferenciador.

El programa solicita el sistema de coordenadas que se tomaran como referencia, para este caso se utiliza la opción “sistema de coordenadas definidas por el usuario” como se muestra en la **Figura 3.14**.



Figura 3.14 Selección del tipo de coordenadas.

Posteriormente en el submenú seleccionamos “cargar puntos PCT”, y se abre el archivo con las coordenadas obtenidas por alguno de los diversos métodos de localización. (**Figura 3.15**).

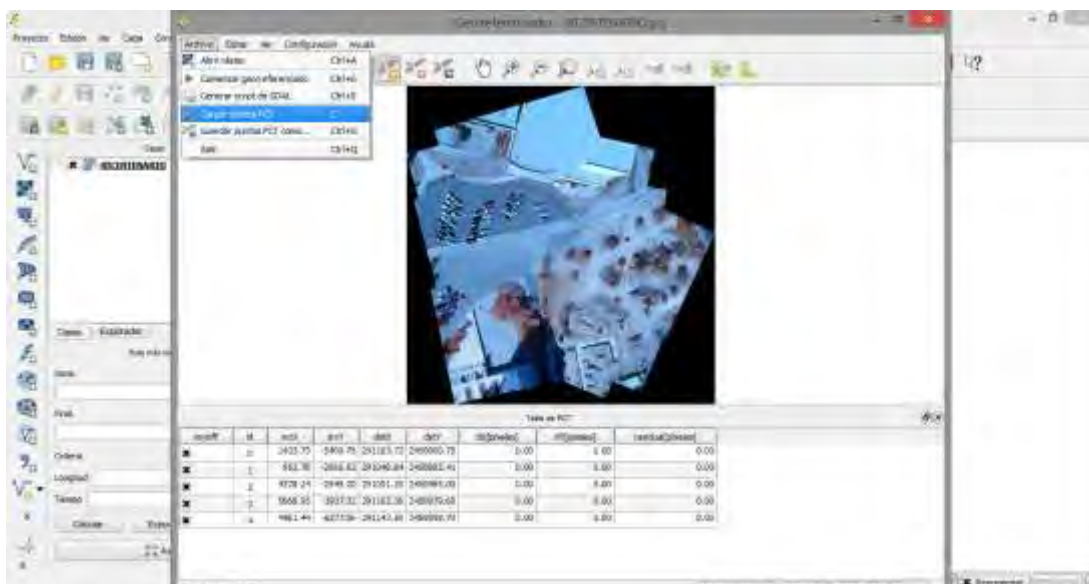


Figura 3.15 Cargar puntos de referencia.

Una vez cargados los puntos y el raster se procede a la transformación (**Figura 3.16**), en el menú “configuración – configuración de la transformación”; tomamos las opciones tipo de transformación “polinomial 1” y método de remuestreo “cubica”.

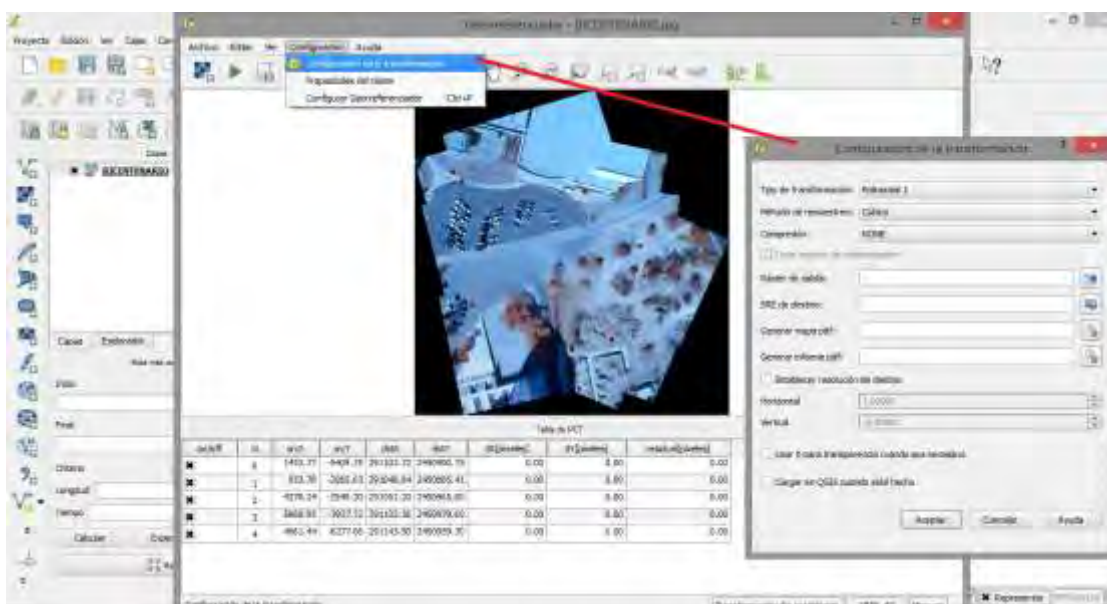


Figura 3.16 Configuración de la transformación.

En el raster de salida se indica la carpeta donde se guardará el archivo y en SRE de destino se indica el sistema de coordenadas correspondientes a la zona donde se esté trabajando. Para este ejemplo es el sistema de referencia de coordenadas GS 84 en la zona 14 (**Figura 3.17**).

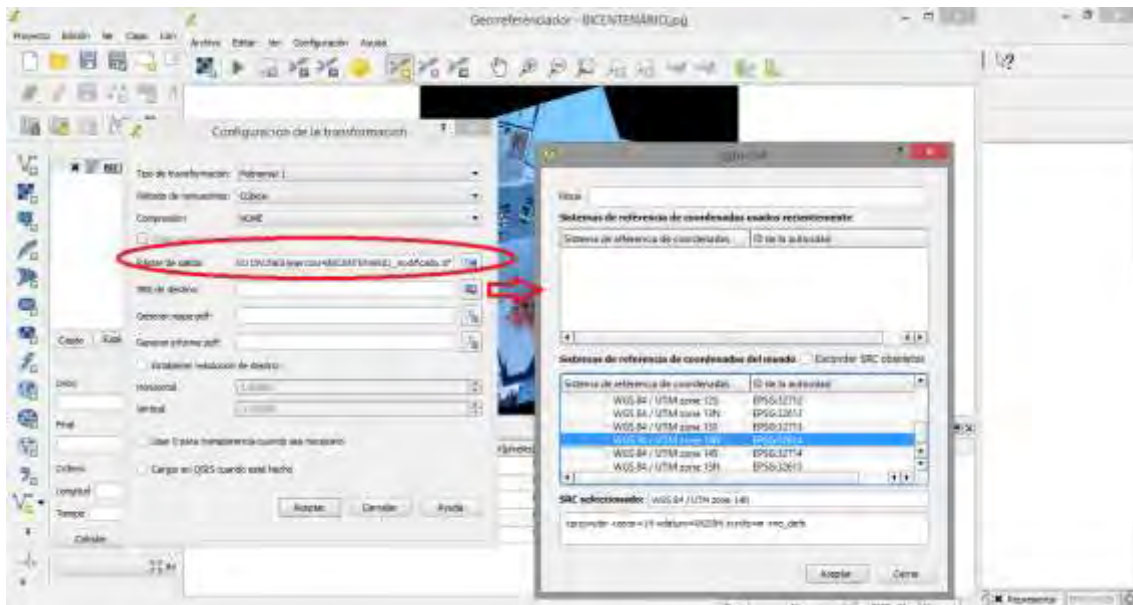


Figura 3.17 Sistema de referencia WGS 84 zona 14N.

Se procede a comenzar el proceso de georreferenciación como se indica en la **Figura 3.18**.

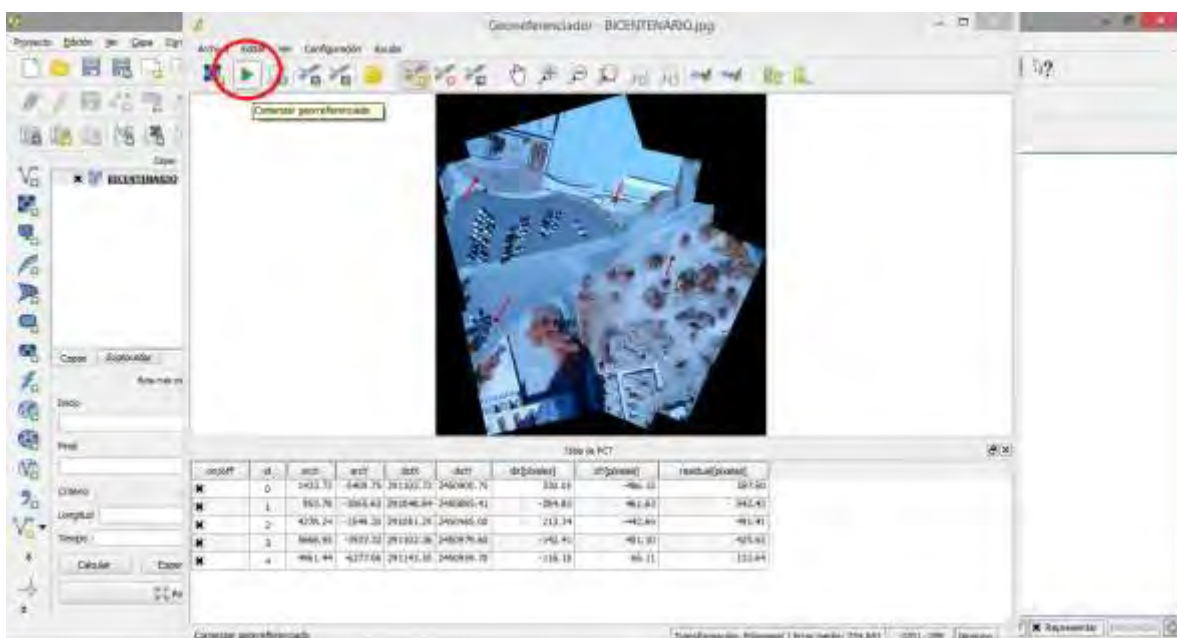


Figura 3.18 Ejecución de la georreferenciación.

El resultado final de los trabajos, obtenido a través de imágenes adquiridas con un VANT, es un aerofotomosaico georreferenciado como se muestra en la **Figura 3.19**, que tiene una exactitud posicional acorde al proceso y al hardware y software empleado.

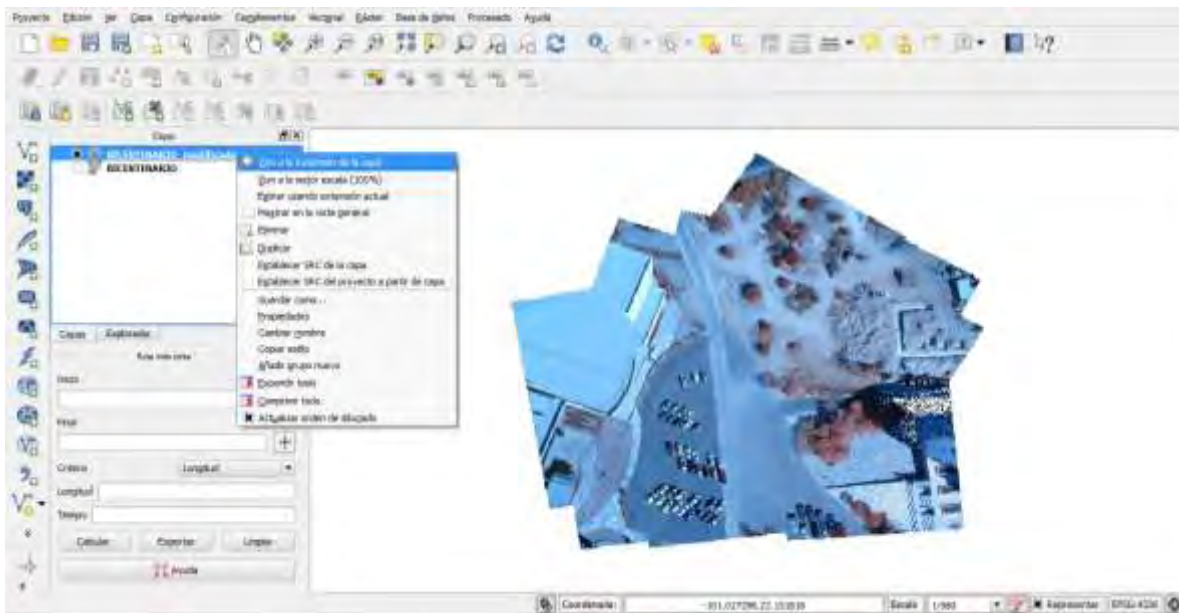


Figura 3.19 Aerofotomosaico georeferenciado.

3.4. Sensores remotos y VANTs

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), para la agricultura del futuro es altamente probable que demanden mucha más información con alta resolución espacial y temporal que la que se utiliza ahora. Es posible ahora tener un manejo árbol por árbol, pero requiere de una colección masiva de datos y su análisis solamente puede realizarse a una escala ahora solo posible 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 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 o reflejada. En consecuencia, 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). La cantidad reflejada por las plantas es inversamente relacionada con la radiación absorbida por los pigmentos de la planta y varía con la longitud de onda de la radiación incidente. Los pigmentos de la planta como la clorofila absorben fuertemente en el espectro solar visible (400-700 nm). En contraste, las plantas reflejan fuertemente la radiación en la región infrarroja (700-1300 nm) proporcionalmente a su densidad y estructura foliar. Este efecto contrastante en el comportamiento de la radiación reflejada por los cultivos en la región roja e infrarroja

cercana del espectro electromagnético ha inducido a generar una serie de índices espectrales basados en tasas de reflectancia en la regiones visible e infrarroja cercana. En consecuencia, como ha sido documentado por Mulla (2013), una gran cantidad de estudios se han enfocado a generar diversas variantes de índices espectrales para estimar propiedades o estado de los cultivos como contenido de nitrógeno o clorofila, biomasa o índice de área foliar (LAI). Cada 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 3.20** 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.

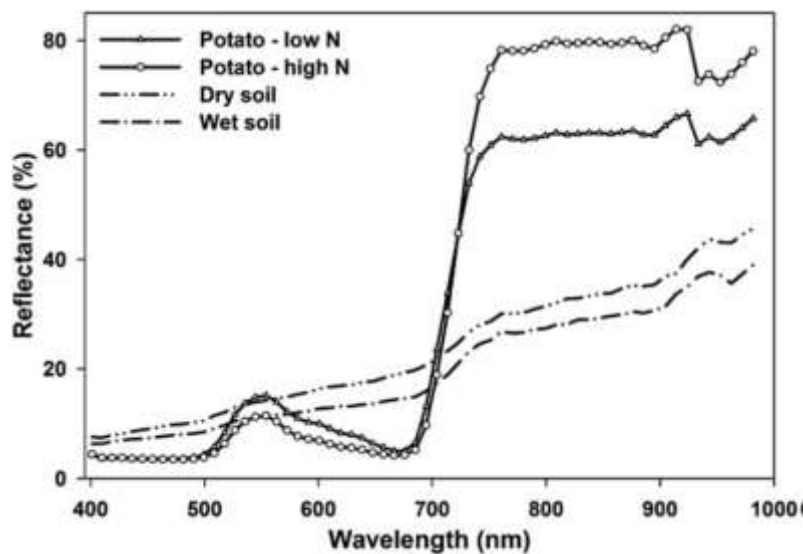


Figura 3.20 Variación en la reflectancia de una parcela de papa en función de su estado de desarrollo y fertilización.

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 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 han sido reportados por (Shanahan et al., 2001), estrés hídrico y nutricional por Bastiaanssen, Molden, & Makin, 2000; grado de infestación de malezas por Lamb & Brown, 2001; insectos y enfermedades por Seelan, Laguette, Casady, & Seielstad, 2003), y la propiedades del suelo como materia orgánica, humedad, contenido de arcilla y pH por Christy (2008), así como salinidad por Corwin & Lesch (2003).

3.5. Uso de VANTs en la agricultura

3.5.1. Agricultura de precisión

La agricultura como sector primario es una actividad altamente demandante de recursos naturales, renovables y no renovables. Es un campo donde la investigación y desarrollo de tecnologías aportan constantemente conocimiento dirigido al uso eficiente y racional de dichos recursos.

El panorama mundial ha puesto en relieve la crisis energética que se vive, aunado al problema hídrico, se configuran dos aspectos de interés mundial. La agricultura convencional es una actividad donde la aplicación de insumos se hace de manera homogénea en la superficie independiente de la variación espacial del suelo, clima o plantas que puedan presentar problemas de enfermedades por plagas y enfermedades. En contraste, la agricultura de precisión pretende mediante la discretización de esta superficie el aporte de los insumos estrictamente acorde a las necesidades del cultivo; dichas necesidades estarán en función de la variabilidad espacial y temporal de los factores naturales como suelo, clima, y artificiales como operación del sistema de riego, etc.

Para poner en marcha una agricultura de precisión, se necesita del monitoreo permanente de la superficie y su dinámica. El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) ha permitido aplicar esta técnica al proporcionar facilidad en el monitoreo de las características de la superficie, pero también en la aplicación de agroquímicos e insumos (**Figura 3.21**), que permite aplicar un agroquímico al cultivo de vid aplicando un producto para favorecer el despunte de yema floral. Los agricultores han comenzado a utilizar drones multipropósito para el monitoreo de los cultivos y la aplicación de agroquímicos.



Figura 3.21 VANT capaz de rociar pesticidas sobre un viñedo (KenGiles/UC Davis) [King, R. 2013].

La aplicación de agroquímicos, de manera asperjada, utilizando VANTs es una actividad que empieza a utilizarse con mayor frecuencia; en universidades existe una amplia participación en los campos experimentales, donde se realiza investigación sobre el uso de sensores y otras tecnologías de medición mediante VANTs. El uso de sensores permite la adquisición de datos y mediante el uso de VANTs se pueden obtener datos remotos sobre el estrés hídrico de las plantas, que son fácilmente detectables mediante imágenes multiespectrales. Un acercamiento de las plantas permite detectar su vigor y así estimar estrés hídrico, nutricional, térmico o sanitario.

Con el enfoque de la agricultura de precisión se pretende una gestión localizada, para lo cual se identifican cuatro fases para su aplicación:

1. Monitoreo.- Consiste en la detección y mapeo de las variables que interesen en cada momento. En esta actividad los VANTs juegan un papel importante para adquisición de variables agrícolas.
2. Toma de decisiones.- Mediante la elaboración del mapa de tratamientos en función del mapa obtenido de la variable de interés, frecuentemente dando respuestas a preguntas concretas: que aplicar, como, cuando y donde. En esta actividad los sistemas de información geográfica juegan un papel importante para generar mapas de aplicación de insumos o recursos.
3. Actuación.- La ejecución del punto 2, y
4. Evaluación de la Rentabilidad.- Verificar si económicamente vale la pena la actividad y desde luego, la evaluación.

Para la ingeniería de riego, los VANTs son herramientas que ofrecen el potencial de monitorear la evolución de un proceso o fenómeno de interés agrícola, como la aplicación del riego para mejorar su eficiencia. Sin embargo, como la mayoría de estos procesos son complejos, cuando se complementan con monitoreo instrumental fijo como el realizado con estaciones automatizadas meteorológicas, puede ser de mayor utilidad para analizar procesos que dependen de una gran cantidad de variables.

La aplicación de VANT en la agricultura está asociada a los siguientes retos como fue mencionado por Chao y Chen (2012):

- ¿Qué medir y controlar?
- ¿Qué entidad/variable necesita ser medida y controlada?
- ¿Cómo medir y controlar?
- ¿Qué sistemas de monitoreo o actuación son requeridos para un misión específica?
- ¿Cuándo medir y controlar?
- ¿Qué tan frecuente se debe realizar?
- ¿En dónde medir y controlar?
- ¿Cómo planear las trayectorias tridimensionales de los sensores y actuadores móviles?

Dependiendo de las respuestas a las anteriores preguntas, los sistemas VANT de uso agrícola deben tener las siguientes características (Chao y Chen, 2012):

i. Bajo costo. La mayoría de las aplicaciones civiles de los VANTs son restringidas por su costo. Muchas veces, aplicaciones basadas en el uso de satélites no son accesibles de manera rutinaria para productores.

ii. Monitoreo a gran y mediana escala. Muchas aplicaciones para agricultura requiere el monitoreo de decenas a cientos de hectáreas, y algunas veces de miles de hectáreas.

iii. Monitoreo frecuente. Varias procesos de interés agrícola requieren del monitoreo frecuente de variables asociadas como la aplicación del riego.

iv. Alta resolución espacial. Algunas aplicaciones demandan la toma de imágenes y videos de alta resolución como la clasificación de la vegetación para detectar su grado de daño o estrés.

v. Fácil manipulación. La mayoría de las aplicaciones agrícolas demandan procedimientos de adquisición, manejo, y análisis, tan fáciles y simples como posible.

vi. Algoritmos avanzados de monitoreo/actuación. Las misiones a realizar con los VANTs requieren de estrategias propiamente diseñadas para monitoreo/actuación.

4. DRONES Y SIG EN LA INGENIERIA HIDROAGRICOLA

En este se analizan a detalle el uso documentado de VANTs en la ingeniería hidroagrícola.

4.1. Monitoreo en Ingeniería Hidroagrícola

4.1.1. Zonas de interés en Ingeniería Hidroagrícola

En términos de una zona de riego, idealmente se pueden identificar cuatro grandes áreas de interés (**Figura 4.1**). Primeramente la cuenca de abastecimiento de la zona de riego, 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 y cumplir con el servicio de riego de manera óptima. El área de actuación de la ingeniería hidroagrícola para el IMTA involucra además de las actividades parcelarias, el proceso de programación y distribución del agua desde la fuente hasta la parcela.



Figura 4.1 Zonas de interés de la ingeniería hidroagrícola.

La gestión de una zona de riego implica una serie de actividades cíclicas durante el desarrollo de un año agrícola como se presenta en la **Figura 4.2**: Planeación, Presupuestación, Programación, Implantación, Monitoreo, y Evaluación.



Figura 4.2 El ciclo de gestión en una zona de riego.

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 vehículos aéreos puede aportar ventajas en estas actividades, ya que en cada una de estas es posible su uso.

La agricultura convencional o extensiva, requiere de grandes cantidades de insumos, los cuales al ser aplicados de manera homogénea sobre la superficie total representa un costo importante. Aplicarlo de manera discreta en función de las necesidades espaciales específicas es ahora posible con la agricultura de precisión, con el uso de herramientas como los SIGs, sistemas de sensores y adquisición remota de dato.

Además de la discretización del terreno para la aplicación de insumos, mediante el uso de VANTs también 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.

4.1.2. Estado fisiológico de los cultivos

En la agricultura de precisión un aspecto importante 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. La **Figura 4.3** presenta una imagen tomada por una VANT donde se muestra a detalle alta variabilidad en el desarrollo del cultivo.



Figura 4.3 Imagen tomada por un VANT de una zona cultivada

Entre los factores a determinar en aplicaciones de la agricultura además del vehículo aéreo, sin duda será el tipo de sensor y cámara que pueda ser montada (Figura 4.4). Existe una amplia gama de opciones de cámaras a usar. Esa diversidad contempla desde el peso del equipo, el tamaño, resolución, versatilidad, etc., dependiendo de lo que se pretenda captar. Existen diversos tipos de cámaras de diferentes marcas que permite duplicar en forma remota la imagen del VANT, esto es, permite realizar una percepción remota en tiempo real. Sin embargo, esto encarece el costo del VANT, el precio puede incrementar el costo en al menos 800 USD, dependiendo de la distancia, resolución y sistema de transferencia de datos.



Figura 4.4 Detalle de un VANT equipada con cámaras espectrales para monitoreo del estado hídrico de parcela (<https://adalidda.com/en/jobs/agricultural-drones-jobs>).

En segundo lugar, se pueden equipar un VANT con cámaras que pueden tomar imágenes multispectrales y dichas cámaras pueden capturar imágenes 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 4.5** 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).

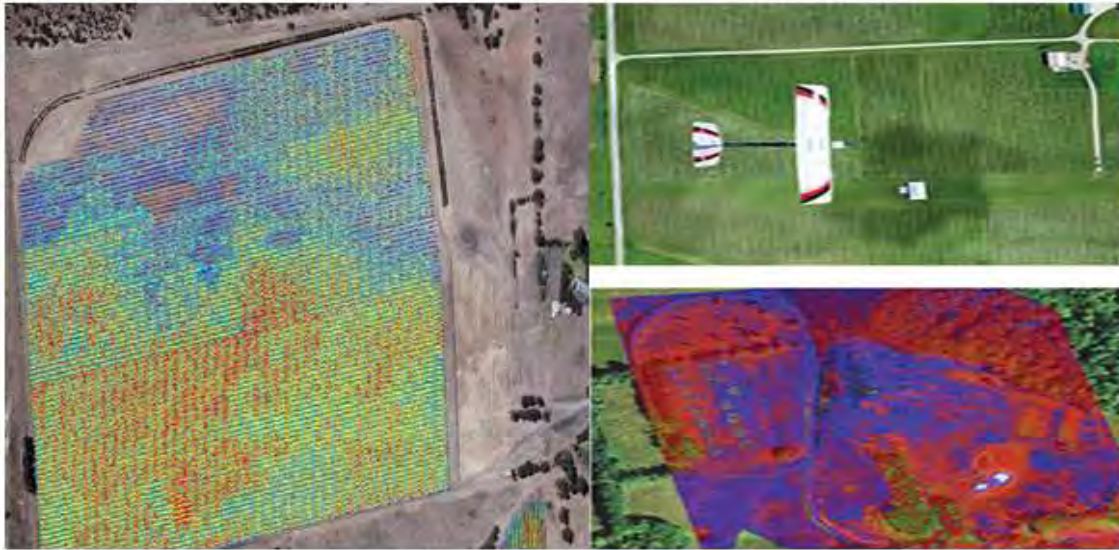


Figura 4.5 Ejemplo de imágenes multispectrales captadas por un VANT (Anderson, 2014).

Por último, un VANT puede revisar los campos cada semana, cada día o incluso cada hora (**Figura 4.6**). La combinación de estas imágenes para crear una serie temporal, permite observar los cambios en la cosecha, revelando áreas problemáticas y las oportunidades que hay para gestionar mejor la cosecha.



Figura 4.6 VANT tipo helicóptero sobrevolando campo de trigo en un área problemática con plaga (Kay Ledbetter, Nov. 2013).

Las cámaras multiespectrales permiten monitorear los cambios en la radiación visible e infrarroja que las plantas reflejan. Con el uso de imágenes multiespectrales se pueden detectar plantas bajo estrés, monitorear su crecimiento o realizar una multitud de funciones de monitoreo, útiles en el manejo de cultivos. Por ejemplo, variaciones en el espectro infrarrojo indican cambios en la vegetación mucho antes de que aparezcan en el espectro visible.

4.2. VANT para la Toma de decisiones en la agricultura de precisión

La agricultura de precisión se refiere a la utilización de sensores remotos para “escanear” plantas y detectar si están sanas, su grado de estrés hídrico y tasa de crecimiento o desarrollo. También puede aportar información para un uso selectivo de los nutrientes y los pesticidas en función de las necesidades de las plantas, reduciendo así el costo y el impacto ambiental. En la **Figura 4.7** se muestra una variación de niveles de radiación infrarroja para facilitar el monitoreo del cultivo.

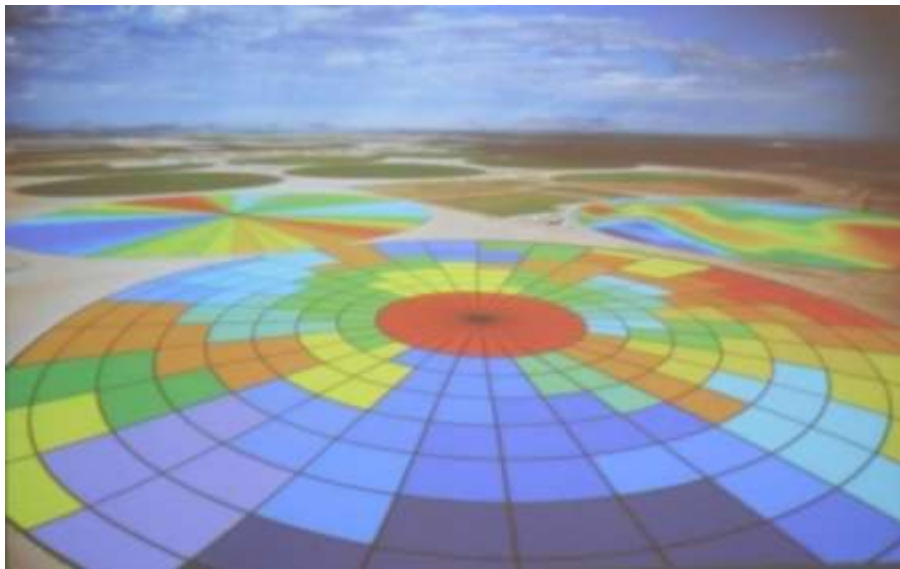


Figura 4.7 Discretización de la superficie con fines de aplicación de insumos (ASABE, 2014)

La inspección de cultivos y ganado mediante el uso de VANTs permite conocer en tiempo real su estado actual.

El monitoreo aéreo puede revelar patrones que ponen al descubierto todo tipo de incidencias, desde problemas de riego hasta variaciones en el tipo de tierra e incluso infestaciones de plagas y hongos que no se ven a nivel del suelo.

Una de las tareas en el uso de VANTs es la definición de su trayectoria de recorrido (**Figura 4.8**). Existe software para planear la ruta que tiene como objetivo alcanzar una

cobertura máxima de los cultivos, así como controlar la cámara para optimizar las imágenes que posteriormente serán analizadas. Estas imágenes a baja altitud ofrecen en el área hidroagrícola una perspectiva desconocida hasta ahora. Comparadas con las imágenes de satélite, son mucho más baratas y ofrecen mucha mayor resolución.

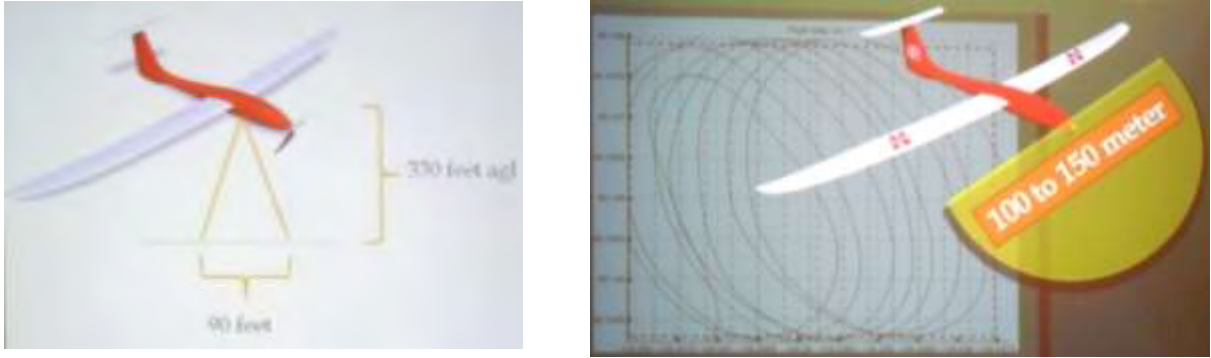


Figura 4.8 Planeación del vuelo con un dron de ala.

4.3. Actuación de los VANT en la agricultura de precisión

Una vez detectada las necesidades espaciales de un insumo o recurso, la siguiente fase de la agricultura de precisión consiste en la aplicación diferencial de dichos insumos o recursos. Esta fase de actuación requiere generar mapas de las necesidades diferenciadas de recursos o insumos para lo cual un VANT puede informar a una máquina de labranza las necesidades de penetración en función de su posición como se presenta en **Figura 4.9**.

La obtención de imágenes multiespectrales es una herramienta fundamental para la identificación de árboles y cultivos enfermos o especies invasoras. Este método proporciona información muy valiosa para solucionar problemas de plagas, analizar la eficacia de los tratamientos aplicados y observar su evolución a lo largo del tiempo.



Figura 4.9 Aplicación diferencial del grado de labranza en la agricultura de precisión.

El uso de vehículos aéreos no tripulados en agricultura es también de gran utilidad en la inspección y mantenimiento de grandes sistemas de riego. Con la posibilidad de realizar vuelos programados con los VANTS, es posible definir una ruta para los puntos a inspeccionar de acuerdo a un programa de monitoreo.

El uso de vehículos no tripulados podría ser la respuesta a la falta de mano de obra en el campo y a una agricultura de precisión para la aplicación de pesticidas (**Figura 4.10**).



Figura 4.10 Aplicación manual de pesticidas

Algunas tecnologías geoespaciales son usadas para observar y manejar la variabilidad en los cultivos. Los VANTs ofrecen una manera más aguda para realizar esta tarea y en combinación con las tecnologías de análisis de datos, se podría diagnosticar problemas y recomendar estrategias de manejo de cultivos más integrales. Un VANT puede proporcionar información detallada para el manejo de los cultivos, por ejemplo, la cantidad de agua que demanda un cultivo, detección de estrés hídrico, análisis de suelo, densidad de población y grado de control de malezas.

La mejora más significativa reside en la reducción de costos de producción como un resultado del bajo consumo de fertilizantes, combustible y agua, pues mediante una estructura de imágenes se pueden detectar los lugares específicos que tienen algún requerimiento y así no aplicar la misma dosis a todo el cultivo. La **Figura 4.11** presenta la aplicación diferencial de compensadores de frío para favorecer el desarrollo de yemas apicales en el cultivo de vid.



Figura 4.11 Aplicación local de compensador de frío para favorecer la yema apical en vid.

4.4. Evaluación y rentabilidad sobre aplicaciones de los VANTs en la agricultura de precisión

Los vehículos no tripulados ofrecen una manera de compilar datos aéreos e imágenes de forma mucho más económica y de mayor resolución en relación con el uso de imágenes de satélite o de sobrevuelos con avionetas.

El uso de VANTs para la vigilancia de los cultivos puede aumentar drásticamente los rendimientos de los cultivos agrícolas y reducir al mínimo el costo de recorrer las parcelas a pie o de utilizar avionetas tripuladas de sobrevuelo. Adicionalmente, el uso de software especializado hace posible producir videos compuestos que muestran el estado fitosanitario de los cultivos.

Los VANTs de tecnología avanzada disponibles en el mercado hoy en día son fáciles de pilotear, ya que en sus microcomputadoras integrados se pueden programar trayectorias de sobrevuelo deseados con utilización de GPS, evitación de obstáculos mediante sensores LIDAR, y regreso seguro al punto de despegue automático. El tiempo de operación posible para un vuelo continuo puede variar entre 10 y 40 minutos, dependiendo en el modelo del VANT, el peso de la carga (de cientos de gramos a varios kilogramos), el tipo de rotores y capacidad de su fuente de energía.

Las aplicaciones más importantes son:

- 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).

4.5. Experiencias sobre aplicaciones prácticas:

4.5.1. Sistema de Monitoreo

En Springfield, Illinois, un agricultor reportó que el uso frecuente de VANTs permitió tomar fotos aéreas de su cultivo de maíz, que fueron utilizadas para seguimiento del desarrollo de su cultivo, ayudando a tomar decisiones de la gestión de forma rápida y eficiente, mientras que con la aplicación de cámaras infrarrojas además puede detectar en cuales zonas de las parcelas se presenta estrés hídrico. Lo anterior es tedioso para realizarlo con recorridos de campo. (News for the 21st Century Farmer, 2014).

Según el mismo agricultor, comentó que la agro-industria será el mercado más importante de la tecnología de drones al futuro. Aunando las posibles complicaciones que puedan interferir en su adopción, como permisos de autoridades gubernamentales para autorizar los vuelos de baja altitud sin interferir en el tráfico aéreo comercial o militar, esta tecnología ofrecerá al agricultor importantes oportunidades para realizar ahorros de tiempo y dinero. Aunque en muchos países el uso de VANTs está muy extendido como en Japón donde la agricultura de precisión es una realidad (Forbes, 2013). Sin embargo, en el futuro se vislumbra varias restricciones que limitarían su uso.

En la actualidad, el panorama regulatorio es muy variable a nivel internacional, por ejemplo, es muy restringido el uso de VANTs en EUA, mientras que en la mayoría de los demás países es menos complicado obtener permisos de operar los VANTs para fines agrícolas. En México todavía no existe regulación para operar VANTs.

En un artículo de la L.A. Times (Chad Garland, LA Times, 2014) se indica que hasta la fecha la FAA (Administración Federal Aeronáutica) de los EUA solamente ha otorgado permisos a muy pocos operadores comerciales de drones. En dicho país, la tecnología de los VANTs se ha utilizado primeramente en aplicaciones militares para vigilancia aérea y bombardeos principalmente, lo que ha retrasado su desarrollo y aprobación para aplicaciones civiles, y en particular, aplicaciones agrícolas. Sin embargo, se espera alcanzar grandes avances en la agricultura de precisión con la aplicación de esta tecnología, incluyendo incrementos en rendimiento y reducción en costos de producción. Las restricciones legales de EUA han resultado en que los empresarios estadounidenses buscan mercados en otros países donde no se aplican reglas tan estrictas, ya que el uso de drones en EUA todavía se limita severamente, solamente permitiendo algunas aplicaciones recreativas y de investigación. Los operadores comerciales de drones de EUA esperan que se implemente legislación para permitir su uso agrícola con sobrevuelos de alturas menores a 120 m hasta el año 2016.

Investigadores de la Universidad Estatal de Utah han desarrollado desde el año 2012 sistemas no-tripuladas para hacer sobrevuelos a bajas alturas, con VANTs que toman fotos y videos transmitidos en tiempo real a una estación base por medio de telemetría inalámbrica, donde se analizan las imágenes para generar mapas o determinar el estado de sanidad del cultivo. En China ya se han desarrollado controladores para fumigación fitosanitaria de precisión específicamente adaptados a los VANT (Hang Zhu, et al., 2010).

Además, es posible programar los VANT para que aterricen en sitios predeterminados para tomar muestras de suelo y agua, una aplicación que el IMTA tendrá que desarrollar en el futuro. Otro posible uso previsto para el futuro es para fumigaciones aéreas de alta precisión. Idealmente, se usarán drones de tamaño reducido para sobrevuelos de detección o pronóstico, y otros más grandes para aplicar fumigaciones en las áreas

específicas de la parcela donde se detectaron infestaciones severas de plagas o enfermedades (Hang Zhu, et al., 2010). (News for the 21st Century Farmer, 2014).

La ventaja de la utilización de los drones tendrá su auge en regiones rurales remotas con espacios abiertos, donde no se presentan obstáculos, que no hay problemas de inseguridad o privacidad, lo cual no se presenta para áreas urbanas.

Los usuarios que ya están utilizando la tecnología de VANTs, reportan que les permite contar con datos de los cultivos con la oportunidad que se requieren e imágenes de alta resolución a una fracción del costo de utilizar avionetas tradicionales o imágenes satelitales. Resoluciones espaciales pueden alcanzar rangos de milímetros a decímetros, debido a la combinación ventajosa de sobrevuelos de bajas alturas con velocidades reducidas de vuelo (Verger A., et. al. 2014).

Se espera que la transferencia de esta tecnología al sector agrícola beneficiará tremendamente no solo a los agricultores de cultivos tradicionales como son los granos, pero en especial a los que se dedican a los cultivos de alta rentabilidad, como la vinicultura y horticultura, donde se pretende usar los VANT para predecir tanto el tiempo adecuado para la cosecha en las diferentes partes de la parcela, como cuales plantas necesitan más nutrientes, y cuales áreas demandan el riego en función del grado de estrés hídrico de las plantas.

Aun cuando se continúa el trabajo de investigación, el uso de sensores térmicos para la detección de madurez en uvas en otras de la áreas de aplicación de los VANTs en el futuro (**Figura 4.12**). El uso de sensores es una extensión a las aplicaciones del uso de VANTs como plataforma de análisis; si bien se piensa en un dispositivo de toma de datos gráficos, ya sea foto o video y esta puede aportar mucha más información, esto implica un postproceso. Con el uso de sensores, la información puede ser aplicable de manera inmediata, por ejemplo en la estimación de la transpiración del cultivo, y en consecuencia la aplicación del riego en tiempo real.



Figura 4.12 Un drone vuela sobre un viñedo para determinar la condición de la uva (Sami Sarkis/Corbis).

La obtención de videos con el uso de drones en agricultura permite el seguimiento de los cultivos; aquí resalta la utilidad sobre todo cuando existen plagas de gran tamaño, llámense ratones, tuzas, etc.

Desde el punto de vista de la protección de animales, ya sea en resguardo o cacería es posible detectar su presencia, mediante un sistema de video en tiempo real como lo pretende el drone Air Angels de la **Figura 4.13**.



Figura 4.13 El nuevo pasatiempo para el protector de animales (www.pentacatalogg.com).

4.5.2. Uso de Sensores remotos

Varios tipos de sensores acoplados al VANT se han probado, incluyendo sistemas de imágenes hiper-espectrales, LIDARs, cámaras térmicas y multiespectrales así como cámaras comerciales RGB. De estos, la imágenes multiespectrales son la de uso más amplio ya que es económica y suministra la información pertinente del cultivo mediante medición de irradiancia en varias bandas espectrales (Verger A., et. al. 2014). Dicha irradiancia se puede convertir en índices de vegetación para elaborar mapas mostrando la variabilidad relativa dentro de la parcela. O bien, se puede convertir en el índice de área foliar (LAI), un indicador de los procesos foliares como la fotosíntesis y respiración, así como la evapotranspiración de la planta. En base de estos indicadores, es posible estimar el crecimiento potencial del follaje, que apoyada en modelos biológicos es posible pronosticar la producción de biomasa, rendimiento o pérdida de rendimiento. El LAI es un factor importante en la modelación de los cultivos, sin embargo, es importante realizar calibraciones con mediciones directos in situ para asegurar la calidad de los datos obtenidos de los sensores remotos, como en este caso, de las cámaras multiespectrales montadas en VANTs.

4.6. Aplicaciones de interés en las áreas de riego y drenaje reportadas en la literatura

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son una de las herramientas de información espacial más importante para aplicaciones geomorfológicas ya que permiten la extracción

de atributos de interés de la superficie terrestre como pendiente, aspecto, curvatura, y dirección de flujo. Los datos de elevación de la superficie terrestre puede ser obtenidos de tres fuentes principales: levantamientos topográficos, mapas topográficos existentes y sensores remotos. Aunque los levantamientos topográficos son muy exactos comparados con las otras dos técnicas, estos requieren de la toma intensiva de datos en campo a través de recorridos que dependiendo de la resolución requerida, demanda tiempo y recursos humanos y materiales. Las tecnologías apoyadas en sensores remotos pueden ser costosas para áreas de unos pocos km². El uso de VANTs para la obtención de modelos digitales de elevación (MDE) ha sido documentada por Moussa-Ouédraogo, et al (2014) para coleccionar datos topográficos de alta resolución en un cuenca pequeña (12 ha).

Otra aplicación reportada por Diaz-Varela *et al.* (2014) es el uso de los VANTs para conocer el estado de obras de conservación del suelo y agua que fueron financiadas con recursos federales. Diaz-Varela y coautores reportaron exitosamente la identificación y monitoreo de terrazas construidas en España (**Figura 4.14**) en el marco del programa CAP (European Common Agricultural Policy). Se usaron cámaras CIR Panasonic Lumix DMC-GF1 para capturar imágenes y así generar un DSM (Digital Surface Model) a una resolución de 11 cm por pixel a una altura de vuelo de 500 m. Estos modelos fueron usados para identificar terrazas usando un método de clasificación a multiescala orientada a objetos. Los resultados muestran (**Figura 4.15**) que el método usado es confiable y robusto para identificar terrazas hasta en un 90% usando exclusivamente datos espectrales y de elevación provenientes de imágenes capturadas con un VANT de alas fijas con una autonomía de vuelo de una hora, un peso total de 5.8 kg y un velocidad terrestre de 63 km/h. El VANT fue controlado por un sistema de autopilotaje autónoma siguiendo una ruta de vuelo usando puntos predefinidos para la adquisición de imágenes. Se utilizó una estación de control terrestre con un sistema de radio (frecuencia de 20 Hz) para comunicación con el VANT para obtener su posición, altitud y estado.

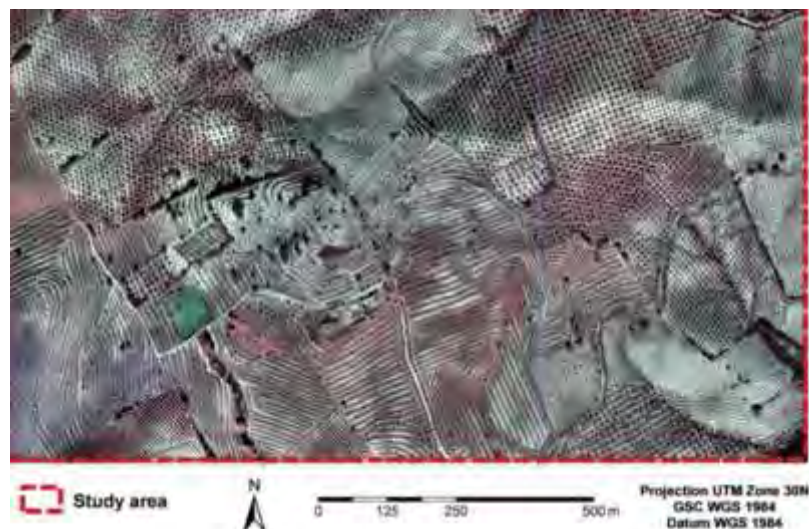


Figura 4.14 Zona de estudio.

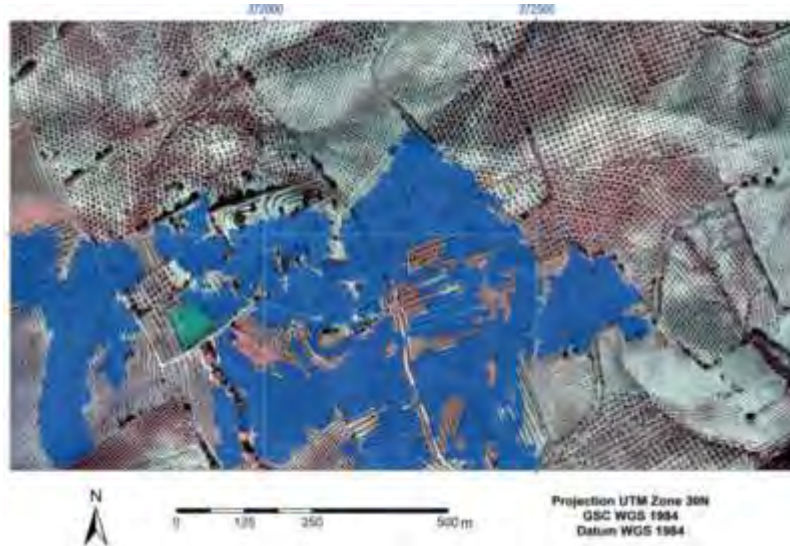


Figura 4.15 Resultados en azul de la zona detectada con terrazas.

Diversas plataformas, metodologías y técnicas se han realizado para obtener imágenes de parcelas cultivadas. Jensen et al. (2007) usó un globo de helio de 1.8 m de diámetro equipado con dos cámaras para monitorear la respuesta de una parcela de trigo (*Triticum spp.*) a varios niveles de fertilización nitrogenada, de 0 a 120 unidades de N, con unidades incrementales de 40. La **Figura 4.16** presenta la plataforma rustica usada en el experimento. Imágenes en color e infrarrojo cercano fueron adquiridas para monitorear la parcela completa de 2 ha. Los resultados indicaron alta correlación entre la imagen y el rendimiento ($R^2=0.91$), sin embargo, una menor correlación fue obtenida para la imagen y el contenido de proteína en el grano ($R^2=0.66$).



Figura 4.16 Plataforma de monitoreo usada.

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 4.17a**) equipado con cuatro cámaras (**Figura 4.17b**), 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 4.18**. El equipo VANT permitió obtener vistas múltiples traslapadas de imágenes a lo largo de un trayecto predefinido. Los resultados obtenidos del estudio indican una muy buena aproximación de los valores del GAI obtenidos con el VANT con respecto a estimaciones terrestres.

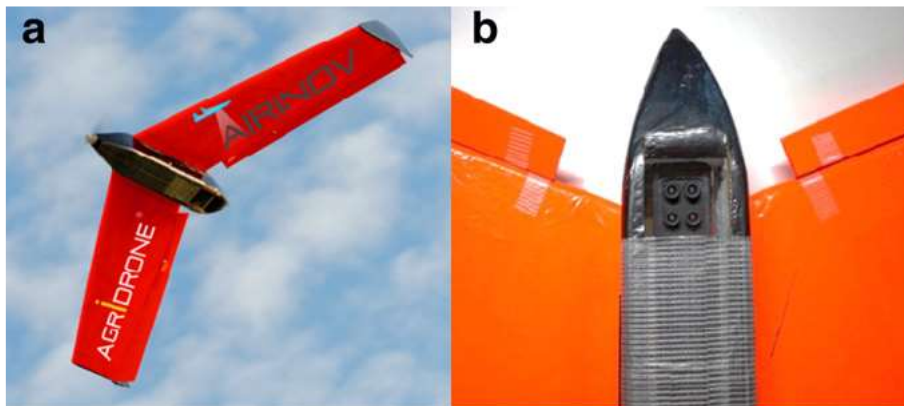


Figura 4.17 a) VANT usado y (b) vista de cuatro cámaras CMOS integradas.

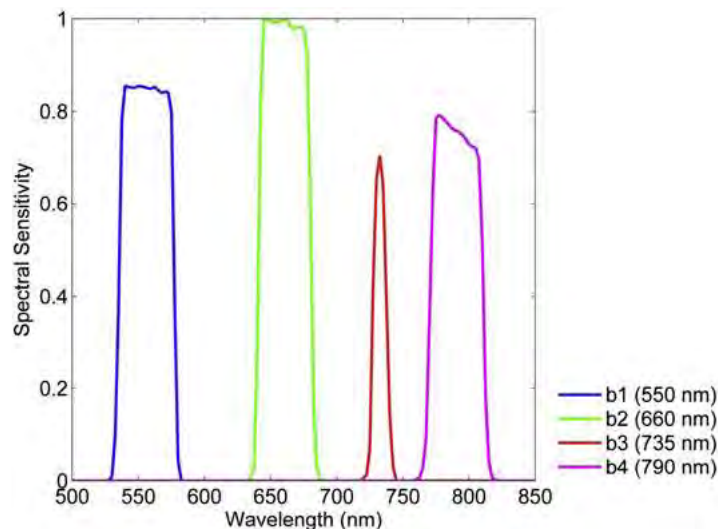


Figura 4.18 Sensibilidad espectral contrastante de las cuatro bandas asociadas a las cámaras del VANT usado.

Uno de los problemas de las plataformas aéreas tradicionales como aeroplanos y satélites es su baja resolución espacial y temporal. Torres-Sánchez *et al.* (2014) usaron un VANT (**Figura 4.19**) 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 and 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 and 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 4.20**).



Figura 4.19 Microdrone MD4-1000 volando sobre la zona de estudio.

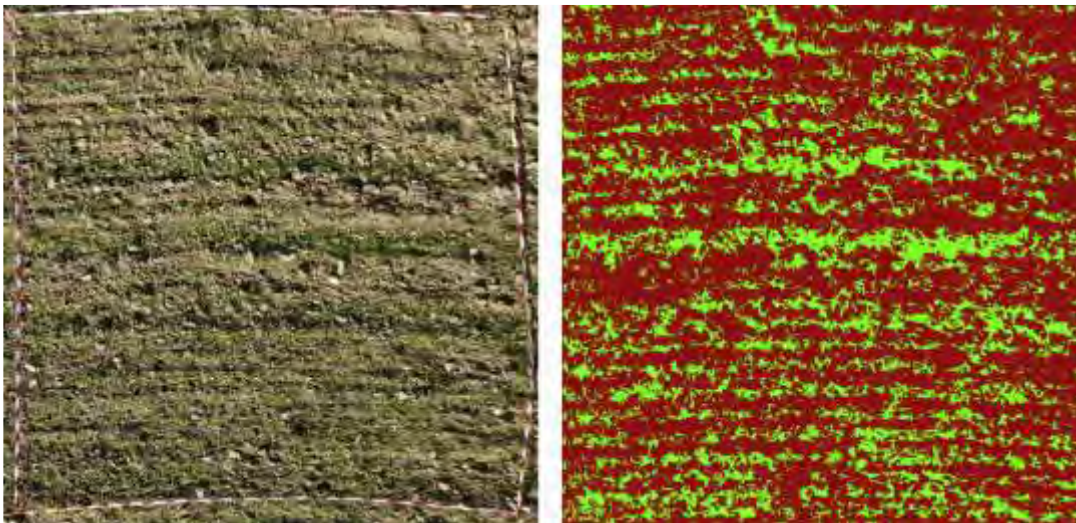


Figura 4.20 Imagen obtenida a 10 m de altura y la imagen procesada después del proceso de clasificación de vegetación.

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 cuadricoptero 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 usadas para definir el periodo de cosechas en vid (Johnson *et al.*, 2003) como se muestra en la **Figura 4.21**. El uso de VANTs también ha sido reportado para detectar la maduración del café (Johnson, *et al.*, 2004).



Figura 4.21 VANT en misión de monitoreo de un viñedo (Johnson *et al.*, 2003).

Los VANTs también tienen un gran potencial para aplicaciones de ingeniería de riego. Con un monitoreo de desarrollo y crecimiento de los cultivo, es posible determinar el grado de cobertura de un cultivo durante diferentes etapas fenológicas de los cultivos y así determinar indirectamente otras variables asociadas. 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 4.22** se presentan los diferentes pasos usados para validar el modelo propuesto. La primera etapa del estudio consistió en obtener imágenes con una cámara digital para su posterior proceso para obtener el porcentaje de cobertura (PGC). Con la ayuda de una estación tipo relación Bowen y una estación meteorológica se obtuvieron los valores de la evapotranspiración del cultivo (E_{Tr}) y de la evapotranspiración de referencia (E_{To}) para así obtener experimentalmente el coeficiente de cultivo (K_c). Con datos experimentales de la altura del cultivo (h), se obtuvo una relación para estimar h en función de PGC. Finalizando con la derivación de una relación para estimar K_c en función de PGC. La **Figura 4.23** 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.

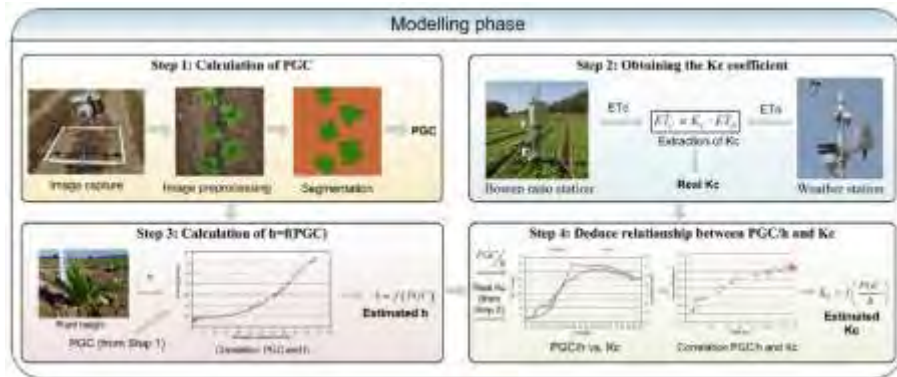


Figura 4.22 Etapas del estudio para calibrar modelo para estimar el Kc.



Figura 4.23 Ejemplo de resultados obtenidos (Kc y h) con el procesamiento de imágenes.

Uno de los usos más recurrentes de los VANTS es el seguimiento del estado de los cultivos. Xiang y Lei (2011) mostraron la **Figura 4.24**, 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 una herbicida en las dos parcelas internas. La segunda imagen muestra que el pasto de las dos parcelas ha sido prácticamente eliminado y solamente suelo desnudo permanece. La parcela interna izquierda fue resembrada, como se muestra en la tercera imagen tomada 20 días después de siembra.

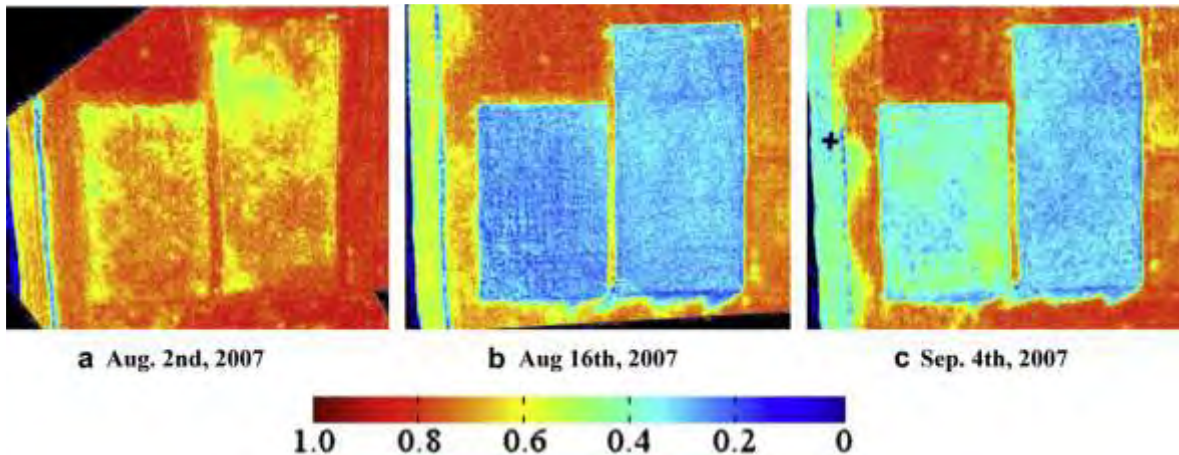


Figura 4.24 Mapa NDVI en Pseudocolor de una parcela de pasto en tres fechas para el año 2007.

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 km/h. La cámara de grado de consumidor RGB fue modificada para detección de color infrarrojo y sincronizada con la unidad GPS. 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 trayectorias de vuelo para generar gran traslape entre imágenes (**Figura 4.25**). Se obtuvieron imágenes de alta resolución VHR (5 m/pixel) para generar orto-mosaicos y modelos digitales de superficie usando métodos automáticos de reconstrucción 3D (**Figura 4.26**). Los autores indican que la metodología usada fue robusta para estimar la altura de árbol y detalle de su corona (**Figura 4.27**).

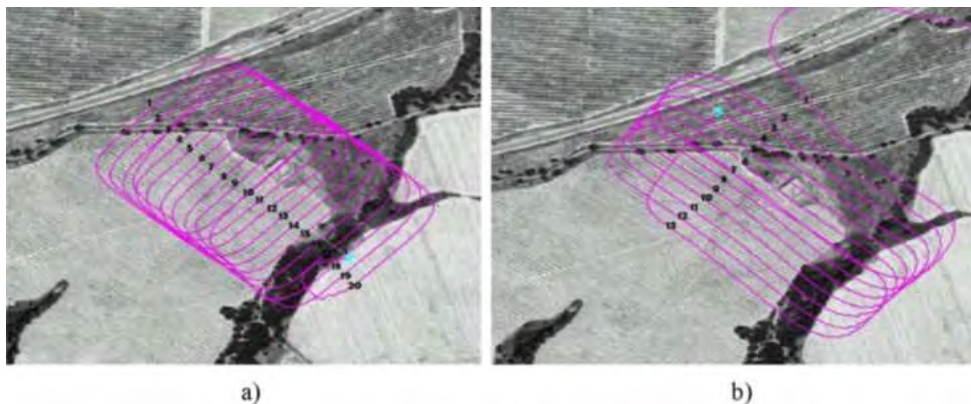


Figura 4.25 Rutas de vuelos usados (este-oeste y norte sur) para asegurar gran traslape de imágenes.

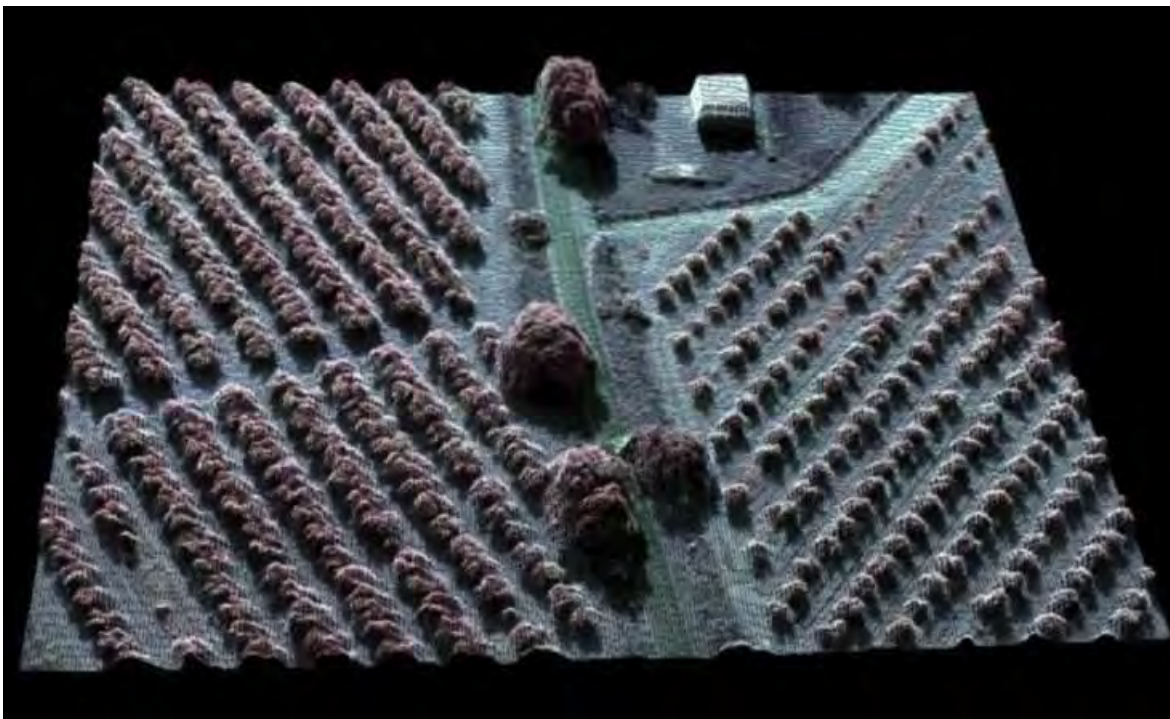


Figura 4.26 Escena tridimensional generada con métodos de foto-reconstrucción usando plataformas basadas en VANTs.

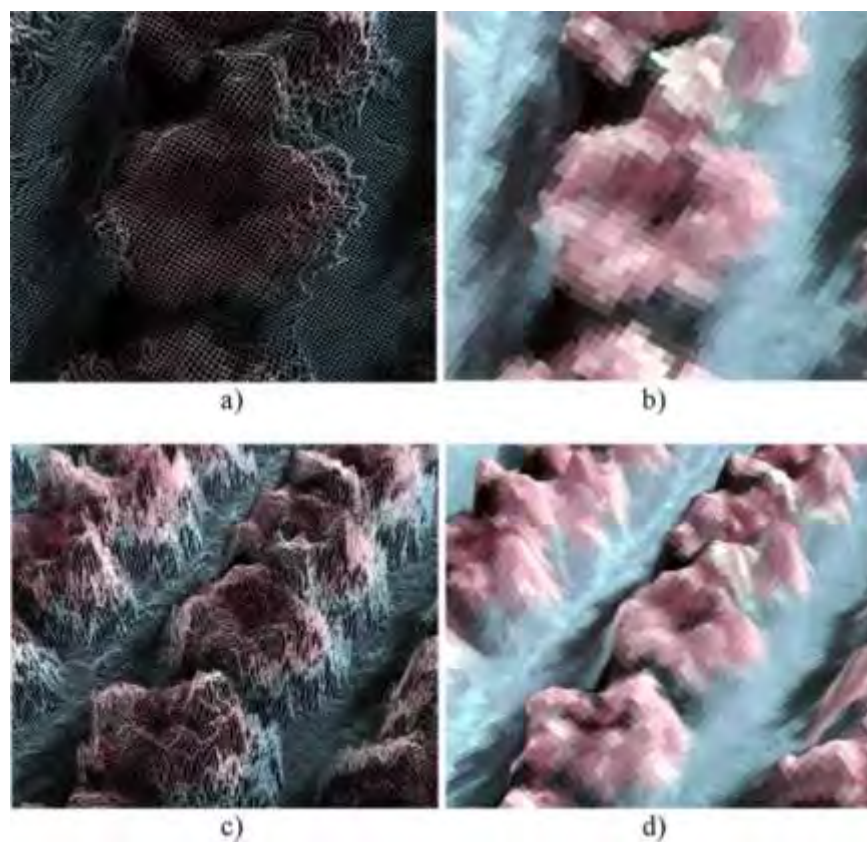


Figura 4.27 Foto-reconstrucción de un simple árbol obtenida de un VANT (a y c) así como obtenidas con ortomosaicos usando DSM (b y d) para detallar la corona de los árboles.

El control de insectos y enfermedades de los cultivos es un factor crucial en el manejo de plagas en agricultura. La aplicación de agroquímicos es frecuentemente requerida para condiciones específicas, tal como tiempo, 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 4.28) 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.

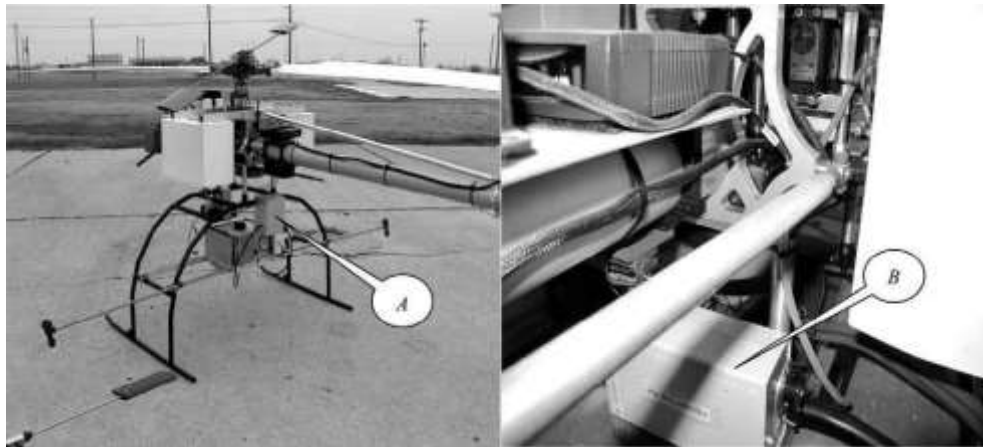


Figura 4.28 VANT usado para la aplicación precisa de agroquímicos (A) equipo de bombeo de pesticidas; (B) caja de controlador.

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 reflectanza 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, con una resolución resultante de 0.5 m y 5.45 cm por pixel. Con fines de validación se localizaron en campo los árboles sanos y los infectados. 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 4.29. 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 4.30 y 4.31). Una de la limitación de la metodología usada fue el tiempo de autonomía de vuelo (10 a 20 min), que depende de la carga del VANT usado.

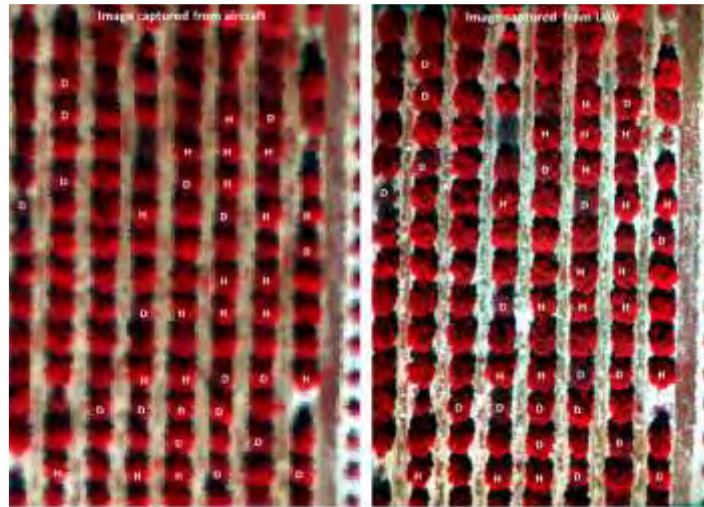


Figura 4.29 Imágenes aéreas adquiridas con un aeroplano (izquierda) y un VANT (derecha) con árboles sanos (H) e infectados con HLB (D).

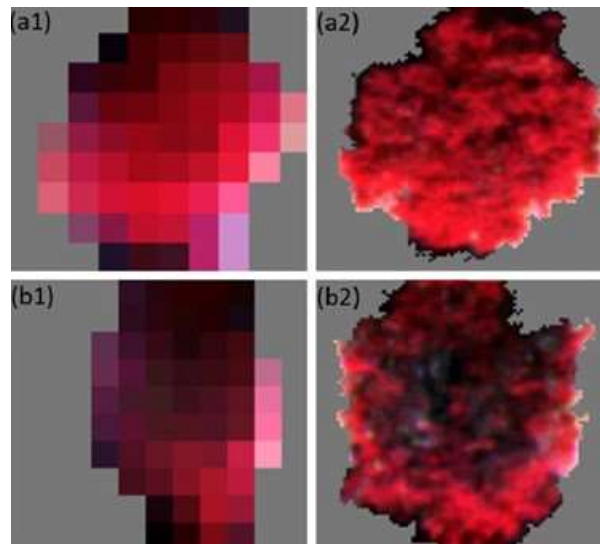


Figura 4.30 Imágenes segmentadas en falso color de un árbol sano (a) e infectado (b). Las imágenes de la izquierda fueron obtenidas con un aeroplano y las de la derecha con un VANT.

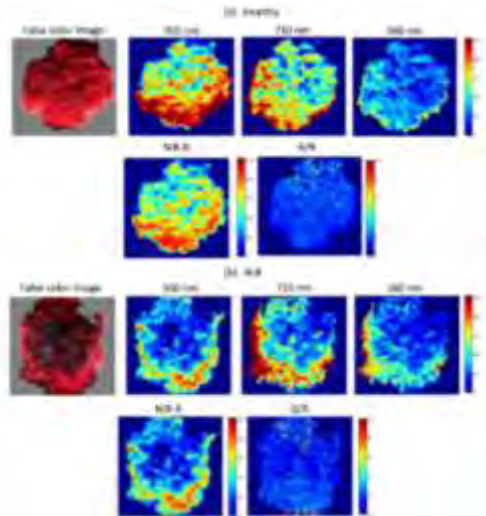


Figura 4.31 Imágenes adquiridas con VANTs en falso color e imágenes con características espectrales significativas de árboles sanos e infectados.

4.7. Desarrollo tecnológico de un VANT

A pesar que existe una gran diversidad de modelos en el mercado que puede cumplir cualquier uso y además de las ventajas que el uso de un VANT representa en procesos de reconocimiento, planeación, etcétera; existe también la línea que representa el desarrollo de un VANT en sí. Dependiendo del uso que se le da al dispositivo es el término que adopta: se llama *drone* si el uso es militar, y VANT si son otros usos. Debido a los implementos que porta, lo más adecuado sería sistema aéreo no tripulado (UAS).

La mayor ventaja que se busca en un vehículo aéreo no tripulado, es que sea de bajo costo, lo que facilita su uso para generar imágenes de la superficie terrestre con características deseable para aplicar procesos fotogramétricos que permiten generar ortofotos a escala 1: 15000 o mayor y que contribuye a la generación de cartografía oportuna, actual y de bajo costo.

Independiente del uso, se espera que el VANT cuente con las siguientes características:

- Más de 2 km de vuelo.
- Capacidad para realizar vuelos en forma manual o automática.
- Motores eléctricos, existen también a combustible pero el eléctrico es preferible.
- Hexacóptero.
- Menor de 3.45 kg.
- Armado en México de componentes de Alemania, Corea, Estados Unidos, Japón.
- Capacidades para realizar FPV.
- Soporte cámaras con lente eye fish (cámara para procesos).
- Cámaras.
- Análisis 3D.

- Mapeo hasta de 5 km².
- Soporta vientos de 30 km h⁻¹.

La tecnología la usamos para conocer si hay personas en riesgo, monitorear el crecimiento en ciudades, predios, en zonas inaccesibles, catastro y desarrollo urbano. “fotodrone.simdif.com”, es un portal en internet (**Figura 4.32**) que ofrece una serie de servicios, fotografías y videos aéreos, fotomosaico georreferenciado, etcétera, con la cual se puede trabajar para realizar diversas actividades ya mencionadas.



Figura 4.32 Portal web de servicios en fotografía y videos aéreos mediante el uso de VANT.

La planeación es un aspecto básico para un proyecto a desarrollar usando VANT. Por ejemplo, para un área de menos de 10 ha, el tiempo mínimo de respuesta implica 4 principales actividades que requieren aproximadamente 4 días:

1. Plan de vuelo	1 día
2. Ir a campo	0.3 día
3. Realizar el vuelo	0.7
4. Procesar	2 días

Por restricción militar, en varios países no es posible obtener imágenes con 50 cm de precisión. En este sentido el uso de aviones no tripulados puede implicar una normativa de este tipo, pero sin duda que puede obtenerse fotografías con esta precisión, y sin duda en aplicaciones agrícolas, puede hacerse una discriminación de daños por sectores o áreas y obtener una mayor resolución en el NDVI, si se usa una cámara con las bandas necesarias para la estimación de este indicador.

Para hacer la comparación o validar el vuelo, en el aparato se tiene un GPS y con ello se puede hacer la corrección de las fotografías, mediante puntos de control para generar ortofotos con menos de 40 cm de error, sin tener que usar puntos de control; si se requiere mayor precisión en el levantamiento, entonces se usan los puntos de control hasta 20 cm o menos.

Entre el equipo básico que debe tener un VANT, sin duda debe ser el sistema GPS, ya sea integrado al mismo vehículo, por medio del cual será posible localizarlo, y al mismo tiempo servir para georreferenciarlo o puede ser incluido también en la cámara, o como un sistema externo. El GPS en la cámara es una excelente opción, las cámaras que utilizan un GPS integrado permiten tomas con errores de 2-4 m.

Dependiendo del dispositivo, será la precisión y exactitud de la foto. La exactitud posicional implica que el punto queda en un mismo rango, y esto es mejor a la precisión. Por ejemplo, el umbral de percepción del ojo humano tiene un rango, en cartografía es de 2 mm, el error gráfico visible. Todos los mapas tiene errores, pero el permisible es de 2 mm; esto indica que en escala 1:50000, 10 mm representa 500 m, 1 mm es equivalente a 50 m y 0.2 mm a 10 m.

Son diversos los ámbitos donde se manifiesta el problema en la dependencia tecnológica, y este no es la excepción; todos a pesar de que existen aplicaciones, todas las partes son importadas, pues no existe en México quien desarrolle productos tanto mecánicos como códigos para este tipo de tecnologías.

Existe una norma para hacer fotointerpretación, independientemente del tipo de vehículo, no es específico para drones, pero es posible que aplique.

Independientemente del tipo de ámbito en el que se pretenda usar VANTs o drones, el aspecto costo debe estar presente. En este sentido, el costo más alto es un dron para uso militar, en aspectos de tecnología, cartografía, teledetección, etcétera. Existe una gran diversidad de VANT sin embargo algunos pueden llegar a costar hasta 1,000,000 de dólares, en cambio un VANT puede costar del orden 30,000 dólares, entonces tiene que estimarse el beneficio/costo, para evaluar la conveniencia de rentar una avioneta.

Desde luego, que también el uso debe ser el otro aspecto a considerar, el tipo de trabajo a desarrollar estará en función, de factores como tiempo de vuelo, superficie, precisión, etc. Los drones militares pueden volar a 6,000 metros (18,000 pies) y quizá vuelos trasatlánticos, lo que para cartografía o topografía es impensable.

Para el ámbito civil, el uso de VANT es sobre todo la herramienta o el medio para obtener imágenes o videos (**Figura 4.33**), entonces la diversidad de aplicaciones depende del equipo y software disponible. En caso contrario se tiene que construir un VANT específico capaz realizar la actividad requerida. Un VANT ideal es un medio para obtener la materia

prima para los objetivos que se persigan. En el caso del IMTA, el vehículo necesario es el que pueda cargar la cámara y que permita obtener los datos necesarios para calcular NDVI, planear el riego, etcétera.



Figura 4.33 Imagen tomada desde un VANT tipo Octocopter.

4.7.1. Agro Ingeniería del VANT

En general las maquinas han ayudado a mejorar la productividad industrial, y actualmente la agricultura no es la excepción, primero con máquinas que involucran fuerza y rutina, pero posteriormente poco a poco se han ido incorporando a otros campos donde el medio es tedioso, agresivo, sucio o peligroso. Las maquinas cada vez se hacen más autónomas y trabajan no solo ligadas con centros de comandos, sino también empiezan a interactuar con numerosos dispositivos que rodean la vida del hombre.

Sin duda, el nivel de complicación puede hacerse modificando los aviones convencionales con alas fijas, o con propuestas para desarrollar artefactos con despegue y descenso vertical, así como micro vehículos capaces de operar en unos cuantos centímetros de espacio, y el uso complementario de paracaídas, y globos de suspensión.

La aplicación de vehículos aéreos no tripulados en cuestiones civiles ha sido exponencial, que después de ser desarrollado para propósitos de guerra, se han generado numerosas aplicaciones, donde la agricultura no ha sido la excepción.

Tareas peligrosas, costosas, tediosas y hasta nocturnas hacen de los dispositivos autónomos una herramienta necesaria y actualizada.

En dichas tareas, el uso de las matemáticas en vehículos aéreos no tripulados es un problema que oscila entre los escenarios más sencillos, de trazar rutas entre diferentes puntos de trayectorias en los campos agrícolas de observación, hasta los escenarios más complicados de optimización, de estabilidad y control.

Los problemas pueden ser técnicamente manejables cuando las necesidades corresponden a velocidades menores a 20 km por hora (300 metros por minuto), ya que estos vehículos operan con baterías recargables para tiempos de vuelo menores a diez minutos, lo que limita las rutas exploradas a menos de seis km y con una carga máxima menor a dos kg (Stombaugh *et al.* 2005; Cao *et al.*, 2010).

El uso de vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) son un complemento a los sistemas tradicionales para la captura de información, con un alto nivel de detalle a bajo costo, hoy en día estos vehículos se están usando como herramienta de captura de información, entre sus aplicaciones encontramos:

- La toma de imágenes aéreas, las cuales permiten a los productores tomar decisiones fundamentadas que pueden mejorar el ahorro de insumos, dinero y afectando menos el ambiente natural (García *et al.* 2011);
- Captura de imágenes aéreas con sensores infrarrojos, luz visible, térmicas, entre otros;
- Imágenes que se combinan con fotografías las cuales muestran como los cultivos están creciendo y transformándose;
- Uso de imágenes para medir los niveles de humedad en el suelo;
- Detección de problemas causados por la sobre fertilización, los animales de pastoreo o las plagas; entre otros.

El creciente desarrollo de los VANTs ha hecho posible su uso para transportar sensores de teledetección, los cuales presentan las mismas ventajas que los sistemas aéreos tripulados, añadiendo otras ventajas como son: el ser operados durante intervalos de tiempo extensos, vuelo de forma autónoma, el costo de explotación y desarrollo es menor que el de un avión tripulado.

Los vehículos no tripulados son aquellos que realizan una misión en forma casi autónoma, ya que el control del mismo se realiza desde tierra ya sea por medio de un controlador. Las matemáticas de vehículos aéreos es una extensión natural de la robótica tradicional donde los modelos ahora tienen más grados de libertad. Las matemáticas están ligadas en forma natural en su construcción y manejo con los principios físicos de la mecánica y en sus aplicaciones con la electrónica, la computación y la fotointerpretación.

El problema de formular las ecuaciones generales del movimiento del cuerpo en estudio implica no violar los principios de conservación del movimiento lineal y angular. La solución está lejos de ser trivial y directa como al principio uno se lo pueda imaginar, el

hecho de que los cuerpos en estudio sean rígidos y no cambien su forma ayuda un poco a simplificar el escenario dentro de las teorías no holonómicas, de estabilidad y del control con condiciones iniciales y finales prescritas.

Los principios físicos utilizados son basados en la complementación de los acelerómetros y giroscopios para proveer los ángulos de Euler $Q = [\varphi$ (rotación) θ (levantado o inclinación) ψ (guiño o ladeo)] T y velocidades $V = [u \ v \ w]$ T en el centro de gravedad como la primera derivada de la posición x , con las ecuaciones diferenciales asociadas (**Ecuaciones 4.1 y 4.2**):

$$m \frac{d^2 Q}{dt^2} + c \frac{d Q}{dt} + kQ = u \quad (4.1)$$

o

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + c \frac{d X}{dt} + kX = v \quad (4.2)$$

Sujetas a condiciones de frontera prescritas, y donde m es la masa, c es la fricción, k es una constante elástica y u , v son la fuerza externa o motriz. Para propósitos de variables de estado, la ecuación diferencial es transformada en un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden para poder implementarse en programación de ambiente Matlab R2012b y resueltas con una variante ode15s del método de Runge-Kutta, como en el caso planar (**Ecuaciones 4.3 - 4.5**).

$$\dot{Q} = \frac{M}{I_{yy}} \quad (4.3)$$

$$\dot{u} = -wq + \frac{x}{m} - g \sin \theta \quad (4.4)$$

$$\dot{w} = uq + \frac{z}{m} + g \cos \theta \quad (4.5)$$

Los datos del comportamiento de trayectorias de vuelo 2D calculando las diferentes variables de estado por medio de la posición y orientación de un vehículo aéreo no tripulado con alas fijas se muestran en el **Cuadro 4.1** y los resultados en **Figura 4.34**.

Cuadro 4.1 Valores de referencia sin considerar la rotación.

Peso (g)	Longitud del cuerpo (mm)	Momento de inercia I_{yy} (10^{-4} kg·m ²)	Velocity (m/s)	θ (°)	ψ (°)
1.8490	46.0	232.8	-4.48	26	6

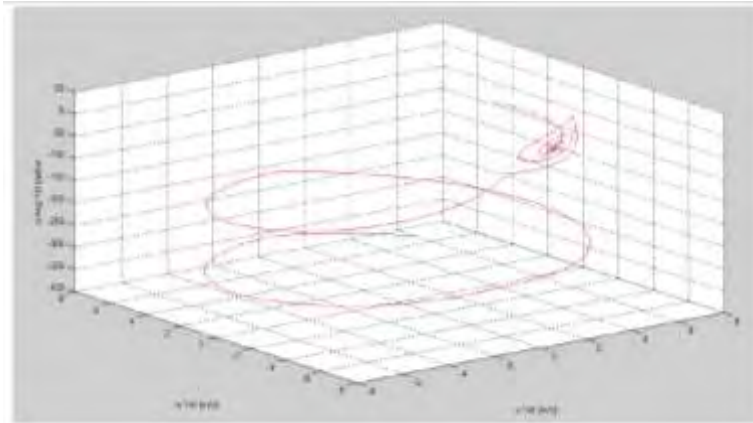


Figura 4.34 Trayectoria circular simulada con las velocidades en un plano (u , w) en m/s para los datos mostrados en el cuadro 4.1, y en eje vertical la velocidad angular en rad/s.

Las operaciones de despegue, vuelo con turbulencia local y descenso requieren diferentes estrategias que deben coordinarse. Algunas de las preguntas básicas son: ¿Que tan lejos se puede llegar? sujetos a ciertos escenarios de viento a favor, en contra o con cierta curvatura dentro del área de operaciones. Una mayor complejidad estriba en buscar optimizar las trayectorias de vuelo usando las ecuaciones que evitan colisiones y obstáculos (Reuder *et al.*, 2008; Cai *et al.*, 2010).

Aun cuando los drones han sido desarrollados y usados en medios militares, actualmente existe una gran familia de robots aéreos tales como los Parrot AR. Drone, que pueden ser operados con iPad, iPhone y iPod-Touch con sistema operativo iOS. Aun cuando los modelos son linealizados los resultados son muy útiles en el control de vuelos y diseño de sistemas autónomos en vuelo libre.

Las aplicaciones pueden ser muy variadas aun dentro de la agricultura moderna, con sus potenciales en áreas de operaciones repetitivas, precisión y de tiempo real, como son levantamiento de mapas de plantas silvestres, movimiento de animales, por medio del uso de procesamiento de datos, y control avanzado.

4.7.2. Oportunidades en el uso de VANT para México

En México, es una actividad que está teniendo grandes avances, de tal suerte que existen diferentes instancias que vende este tipo de servicios, como ejemplo se menciona una compañía mexicana con sede en Guadalajara la cual trabaja con pequeños aviones no tripulados para aplicaciones diversas.

Hydra Technologies, construye y opera a los vehículos aéreos no tripulados (UAV) S4 Ehécatl y El Gavilán que tiene un peso de 5 kilogramos y sólo 1.5 metros de envergadura, con componentes hechos en su mayor parte en México. El sistema más avanzado, el S5-

Kukulcán, mencionan que podrá volar sin piloto hasta por 16 horas con un radio de acción de 250 kilómetros.

Los VANTs cuentan con un sistema de navegación y control, con un piloto automático que permite que el vehículo siga una ruta preestablecida, y se recupere en caso que condiciones meteorológicas como ráfagas de viento los desvíen o desequilibren. La diferencia más importante entre los aviones de control remoto y un VANT de este tipo radica en el tipo sensores usados: el dispositivo envía a sus operadores las imágenes capturadas con sus cámaras, que dependiendo de las necesidades pueden incluir funciones de zoom y de visión térmica para uso nocturno. (Las imágenes, al igual que las señales de control, viajan encriptadas para que no puedan ser interceptadas o modificadas por terceros).

En México existen algunas empresas que se dedican a este giro, producción, venta, renta de aviones no tripulados para un control en el vuelo, existen algunas alternativas para evitar los problemas de choque, entre ellos un armazón que puede valer 175 dólares, o un sistema solar, que puede ser más barato; como en todos estos casos, la mejor opción será la que mejor se adapte a las necesidades del vuelo, y desde luego al costo.

El ruido puede tener connotaciones importantes en el momento de monitorear eventos clandestinos. Uno de los VANT tecnológicamente más adecuadas es el Aerial Map Koreano. Advanced Aerial Map puede soportar vientos de 40m millas por hora. Es un helicóptero, que puede permanecer en el aire por 2 hrs, pero a mayor peso es mejor el multicóptero comparado con el de ala (avioneta), vehículos con motor a gasolina tienen un mejor rendimiento, y mejor planeación con respecto a los eléctricos. En vehículos eléctricos, el tiempo de la batería depende sobre todo de los desplazamientos, como por ejemplo, un arrancón o cambio no planeado en dirección, durante ese proceso puede haber un gran desgaste de energía. En algunos casos, se tiene el motor a gasolina para el multicóptero, y la batería para los sistemas auxiliares, y desde luego los sensores.

El sensor Telemaster Plus Hoverfly Scripta (**Figura 4.35**), es un tipo de multicóptero para los partidos de fútbol, se cree que tiene una gran estabilidad, la base donde se monta la cámara es de tres ejes, y se compensa automáticamente en cabeceros, laderos y giros, esto permite una mayor claridad en la fotografía, y de alguna manera su tratamiento. Algunas de sus características son: su GPS para mantenerse en una posición y regresar a casa, 360 grados de giro, radio controles para manejo manual, vuela de 10 a 15 minutos con 2.6 kg., pesa 4.2 Kg, con motores de la familia E1000 Octo-rotor System Retractable, lo cual es una ventaja al momento de transportarlo.



Figura 4.35 Izquierda: Telemaster tipo avioneta; Derecha: Hoverfly, Multicoptero con tecnología Scripta (Hoverfly Technologies).

El equipo Trimble UX5 permite generar cartografía a nivel fotográfico, tiene un costo de 110 mil dólares. El eBee suizo, hasta 3 cm con tamaño de pixel, puede crear un modelo de elevación con una precisión de 5 cm.

Hay más de 100 tipos comerciales de VANTs, cada uno con características particulares para requerimientos muy específicos: armazones, baterías, controles de velocidad electrónicos, etc.

En función de las necesidades particulares, será el tipo de VANT por adquirir.

5. EQUIPOS COMERCIALES

A continuación se describen algunos equipos comerciales para diversos usos de interés agrícola.

5.1. Multicopteros

5.1.1. AIBOTIX

La empresa AIBOTIX cuenta con drones para una amplia gama de aplicaciones, el AIVOXT X6 (Figura 5.1) es VANT interesante.

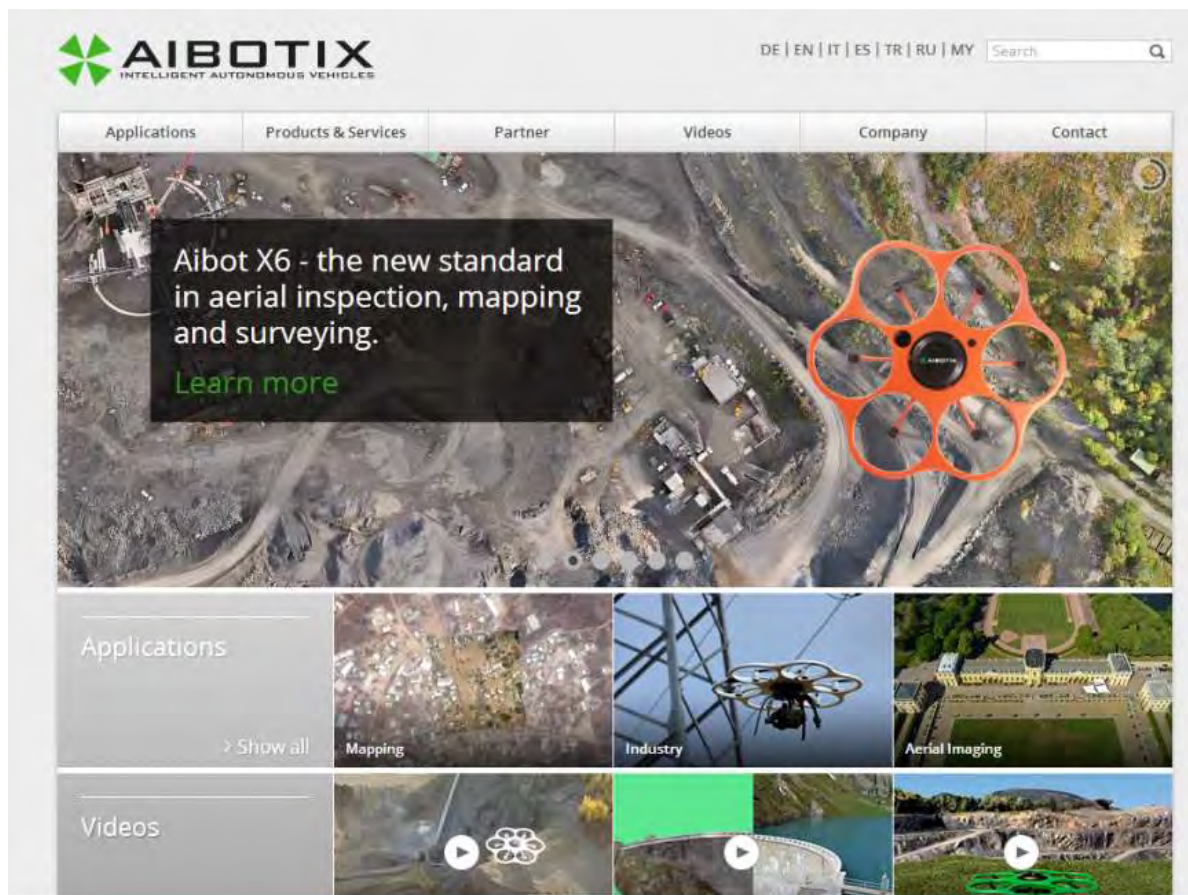


Figura 5.1 Portal AIBOTIX. (www.aibotix.com).

Los principales usos civiles son:

- Generar cartografía, cuyos productos pueden ser útiles en áreas de restauración de vías públicas.
- Planeación de la zona urbana, para actualizar el catastro, etcétera.

La **Figura 5.2** muestra que la industria es uno de los sectores que más se interesa en esta herramienta, entre otras.

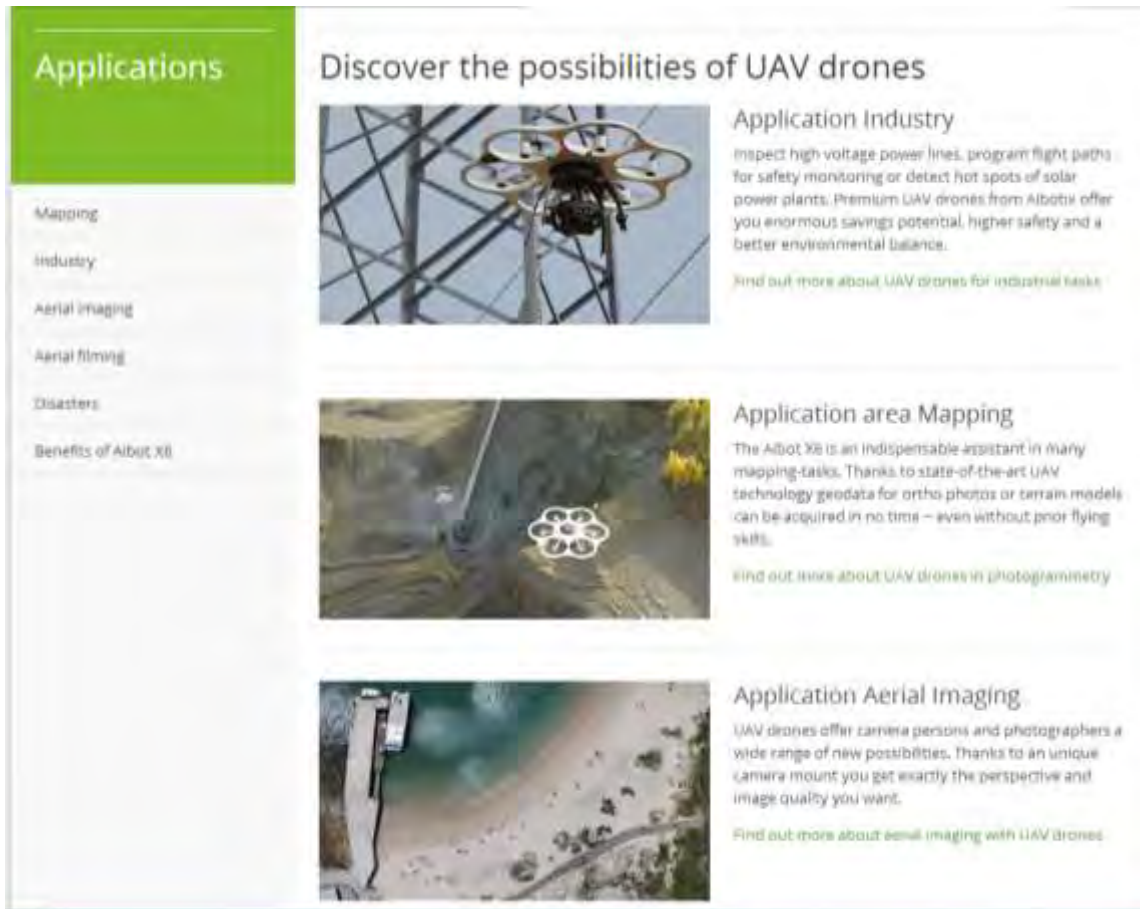


Figura 5.2 Diversidad de aplicaciones para los VANTs.

Desde el punto de vista aeroespacial, se tiene algunas actividades por:

- Topografía, a través de instrumental óptico mecánico, óptico electrónico y GPS.
- Fotogrametría, generación de fotografías que permiten la corrección de errores.
- GPS, satélites que orbitan, como las constelaciones, NAVSTAR, departamento de defensa de los Estados Unidos, emiten posición y hora y en tierra, el aparato hace cálculos telemétricos.
- Percepción remota pasiva y activa, generación, envío, tratamiento digital de imágenes, como son; Landsat, Spot, QuikBird, lo que permite observar superficies en la tierra.
- LIDAR.
- SIG, la integración de datos, en mapas y el manejo de imágenes, por ejemplo; ortofotos del INEGI, proviene de la fotogrametría, con SIG, se obtienen zonas de interés lo que nos permite realizar su análisis, modelar, y hacer toma de decisiones.

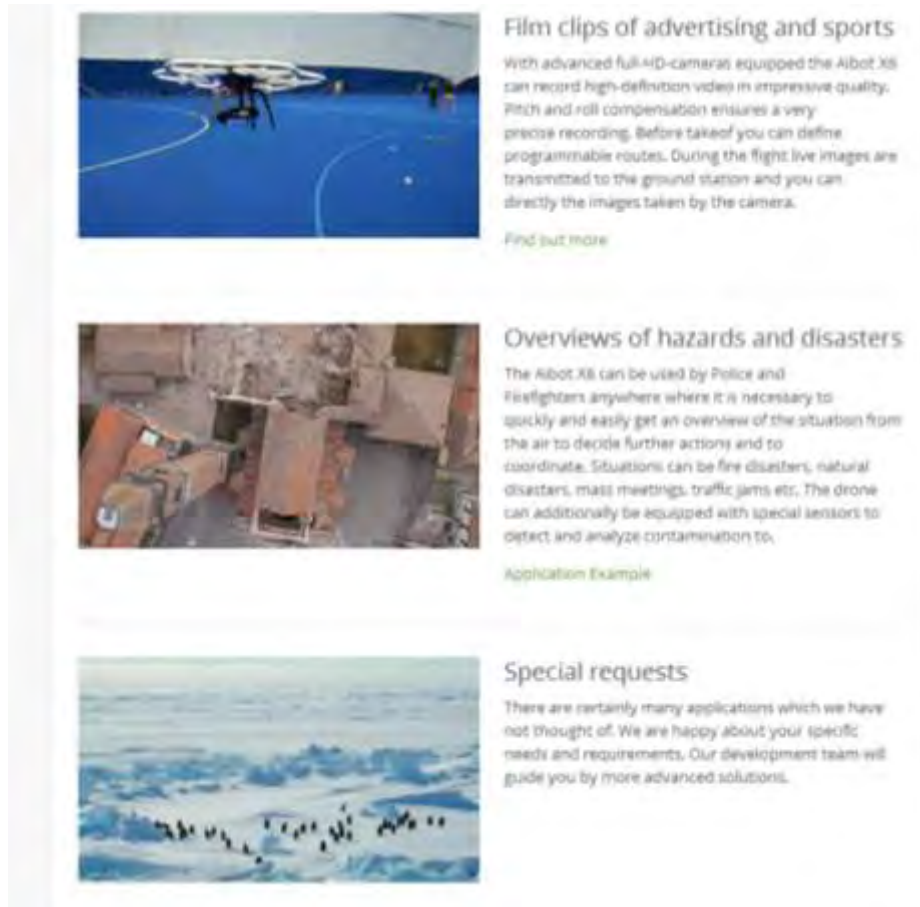


Figura 5.3 Aplicaciones de lo VANT en desastres y prevención de riesgos. (www.aibotix.com)

Uno de los más usados es el Aibot X6 V2 de la **Figura 5.4**.



Figura 5.4 VANT modelo X6 V2 AIBOT. (www.aibotix.com)

Algunas características de este modelo se muestran en la **Figura 5.5**, donde destaca la posibilidad de despegue y aterrizaje totalmente automática.

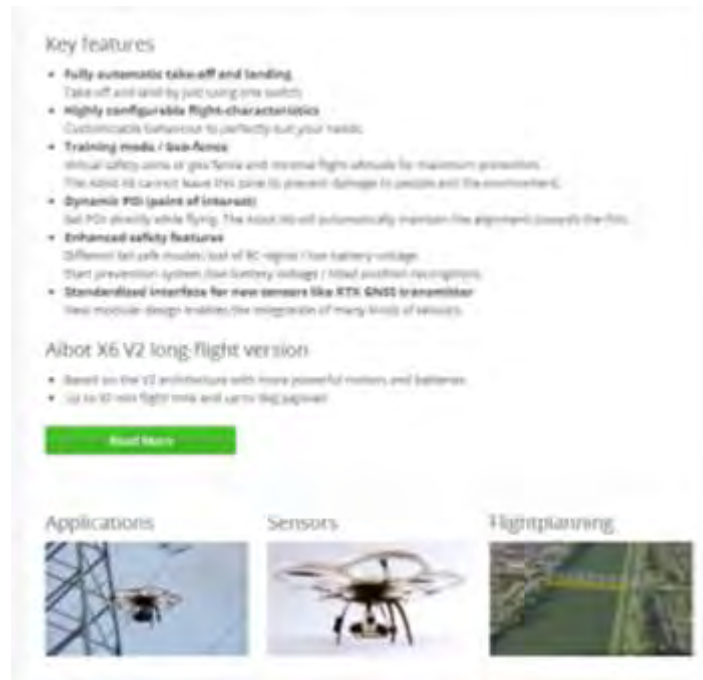


Figura 5.5 Características principales del X6 V2 AIBOT. (www.aibotix.com)

Porta una cámara en el vehículo que permite observar lo que la aeronave está viendo, además que el Aibot X6 permite el uso de sensores montados en su estructura auxiliar (Figura 5.6). El tipo de sensor depende del objetivo, no obstante una calidad indiscutible debe ser el peso y tamaño del sensor.

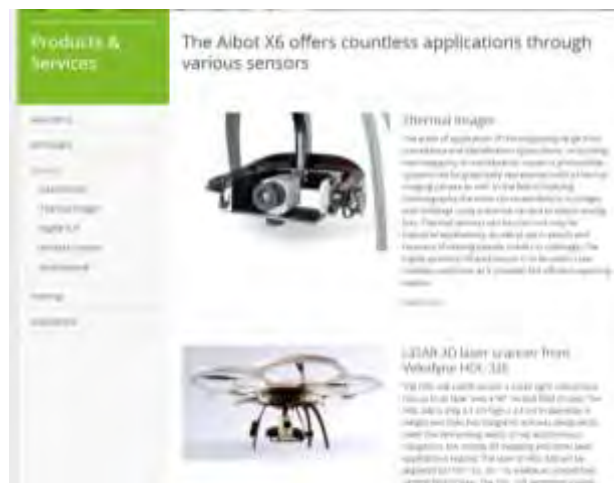



Figura 5.6 Aplicaciones del X6 AIBOT a través de varios sensores. (www.aibotix.com)


Otro tipo de sensores son las cámaras multiespectrales (Figura 5.7) que permiten diferenciar la firma de la vegetación, indiscutiblemente útil en el cálculo de índices de vegetación y con ellos algunos factores como estrés hídrico y daños por plagas o enfermedades (Figura 5.8).



Digital SLR (georeferenced)

With the help of digital SLR cameras we can take high-resolution images and video recordings. WE can produce professional SLR images with excellent quality and spectacular detail, which make it ideal for analytical applications of any kind, such as the inspection of bridges or overhead power lines.

[Read more](#)



Multispectral

The equipment of the Aibots with multispectral cameras increased the scope is an important element. This now means that multi-spectral images of broad areas and motifs can be generated. This is an excellent addition to the detail shots of the digital SLR cameras.

[Read more](#)

Figura 5.7 Cámaras multispectrales. (www.aibotix.com)

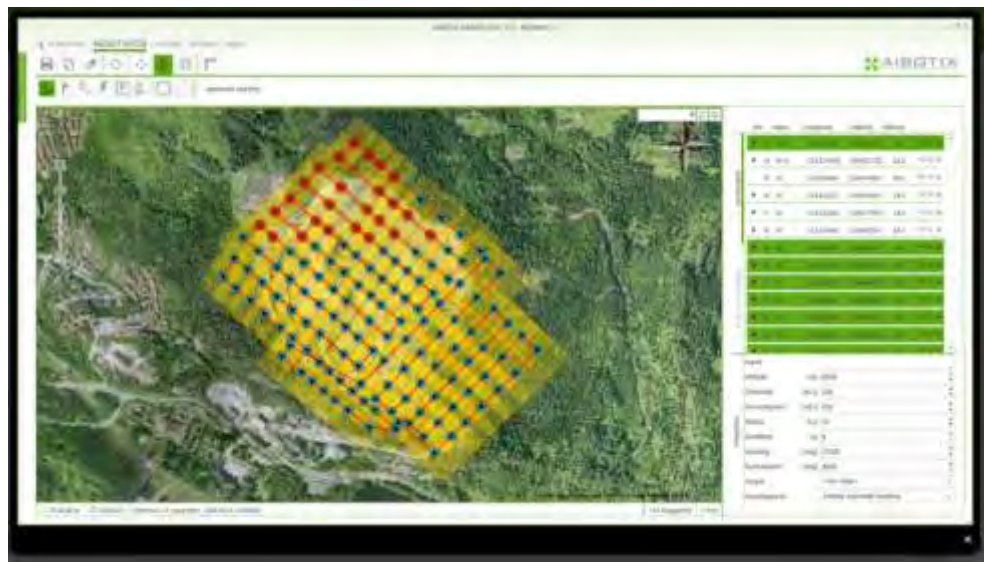


Figura 5.8 Análisis del cultivo a través de imágenes multispectrales.



Figura 5.9 Componentes básicos de un VANT.

Este dispositivo cuenta con una cámara con tecnología para una toma aérea esférica **Figura 5.10**.



Figura 5.10 El TAYZU 720 Quadcopter mostrado en la exhibición CES 2015.

El Tayzu 720 tiene integrada una cámara que utiliza dos sensores, uno abajo y uno arriba, en el pequeño quadricoptero con un chasis que puede tomar el video hacia todas direcciones.

5.1.2. Drone tools

La empresa española Drone Tools ofrece varios tipos de multicopteros. El equipo hexacoptero (**Figura 5.11**) de dicha empresa tiene las siguientes características interesantes para aplicaciones hidroagrícolas:

- Autopiloto con aterrizaje autónomo, vuelta a casa
- Pilotaje asistido y punto de interés (POI)
- Capacidad para realizar giros de 360º con la cámara apuntando a un objetivo prefijado. Unidad Inercial de aluminio aeronáutico.
- Emisora Futaba T14SG con sistema Faast de 14ch con telemetría hablada, en pantalla y alarma vibratoria de voltaje del dron.
- Chasis Dronetools Hexa de fibra de carbono 3K.
- 6 motores de alto rendimiento AXI con garantía de por vida.
- 6 hélices de alto rendimiento.
- Montura de cámara Cinestar de 2 ejes estabilizados. 4 barras de LEDs de alta luminosidad.
- 6 Niveles de aviso luminoso y sonoro de batería baja.
- Adaptador antivibración para montura y multirroto de absorción dinámica.
- Caja negra de abordo para almacenamiento de datos de vuelo y OSD.
- Pupitre estación de tierra. Sistema de vídeo downlink en 5,8Ghz con 2 antenas de polarización circular. Control de cámara con disparo de foto, video y zoom (según cámara). 2 baterías 2200mAh para estación de tierra. Pantalla de LED 7" de alta luminosidad y parasol.
- Montura Cinestar de 3 ejes de fibra de carbono con estabilizador HoverflyGimbal y emisora extra Futaba de 8ch para el control independiente de cámara mediante un operador de cámara. La montura más versátil del mercado con servos Savox de alta velocidad. Diseñada para todo tipo de cámaras.
- Mediante software de autopiloto en PC o IPAD, se puede establecer una ruta con el cursor del ratón sobre un mapa de GoogleEarth. Además se reciben los datos de telemetría como posición, autonomía, altura de vuelo, velocidad, etc.



Figura 5.11 Hexacoptero para aplicaciones agrícolas de la empresa Drone Tools.

5.2. Funcionamiento de un equipo ALA

5.2.1. El eBee

El VANT para fotografía, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) vuelos programados, antes y durante el vuelo; tiene un programa, que puede aterrizar automáticamente de donde salió, puede cubrir entre 1 y 10 km² y una altura máxima de 80 m (más allá el obturador se cierra), no se necesita experiencia como piloto al igual que tampoco necesita un dispositivo de despegue, puede hacerse de manera manual y automáticamente para estabilizarse (Figura 5.12).

La cámara que contiene, puede tomar fotos que se procesan para generar ortofotos en nubes de puntos que pueden ser manipulados.

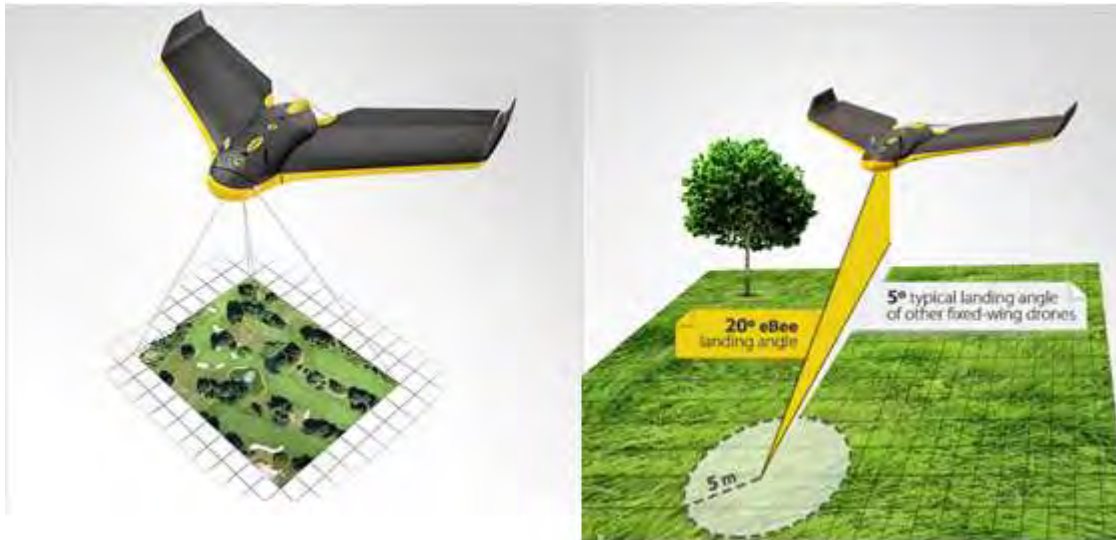


Figura 5.12 Equipo eBee.

El paquete eBee, incluye:

- El aeroplano autónomo, listo para volar, pesa 670 g, viene desarmado y su proceso de armado es muy simple. Con una propela de repuesto. Necesita 30 metros para su lanzamiento.
- La cámara digital compacta integrada, RGB de 16 MP, con su cargador de batería de cámara con autonomía de 45 minutos puede tener una amplitud de 3 km.
- Viaja a una velocidad entre 36 y 50 km/h en crucero, resiste vientos de 45 km/hr.
- El aterrizaje puede ser diferente de donde salió y necesita un radio de 30-50 m en línea recta.
- Usa Windows Vista, 7 o 8.
- Operado vía internet.
- Alcance de vuelo hasta de 3,000 m, sin embargo se recomienda para vuelos entre 80 y 800 m.
- Distancia de resolución, 5 cm pixel 140 m a 1.5 km.
- Utiliza emotion 2, permite planificar, simular y monitorear, controlar la trayectoria del eBee.
- Con el software Postflight Terra 3D-EB, se procesa la información y permite crear orto mosaicos georreferenciados y modelos digitales de elevación.
- Su costo es de 26,000 USD.

5.2.2. TRIMBLE_UXS

En agricultura de precisión un aspecto importante es la detección de zonas (Figura 5.13). Una alternativa es el TRIMBLE_UXS que pesa 2.5 kg, por lo tanto es más estable y presenta más ventajas, pero también tiene desventaja en el tren de aterrizaje, el costo es de 100,000 USD.



Figura 5.13 Trimble_ UXS con sistema de despegue.

5.3. Programas (páginas web)

5.3.1. MOSAIC <http://www.mosaicmill.com/index.html>

La compañía MOSAIC ofrece un portafolio de servicios relacionados con el uso de VANTs y actividades complementarias (Figura 5.14). Cuenta con un módulo específico para aplicaciones en agricultura, desde la plataforma (VANT) para hacer el reconocimiento y la obtención de los productos, así como el posproceso.



Figura 5.14 Portafolio de servicios en línea (www.enzomosaic.com)

Si lo que se pretende es obtener índices de vegetación, el proceso puede ser discretizado en cuatro grandes etapas (**Figura 5.15**): Planeación, toma de imágenes (vuelo), la ratificación de las imágenes y la obtención de los índices de vegetación. Para cumplir estas etapas, en cada una de ellas existen una serie de dispositivos, desde la plataforma o el VANT que será donde se monten los sensores, cámaras, etc. Dependiendo de estos sensores será el producto a obtener. Para el caso que se ejemplifica se necesita una cámara espectral donde la banda del infrarrojo, permite el producto deseado.

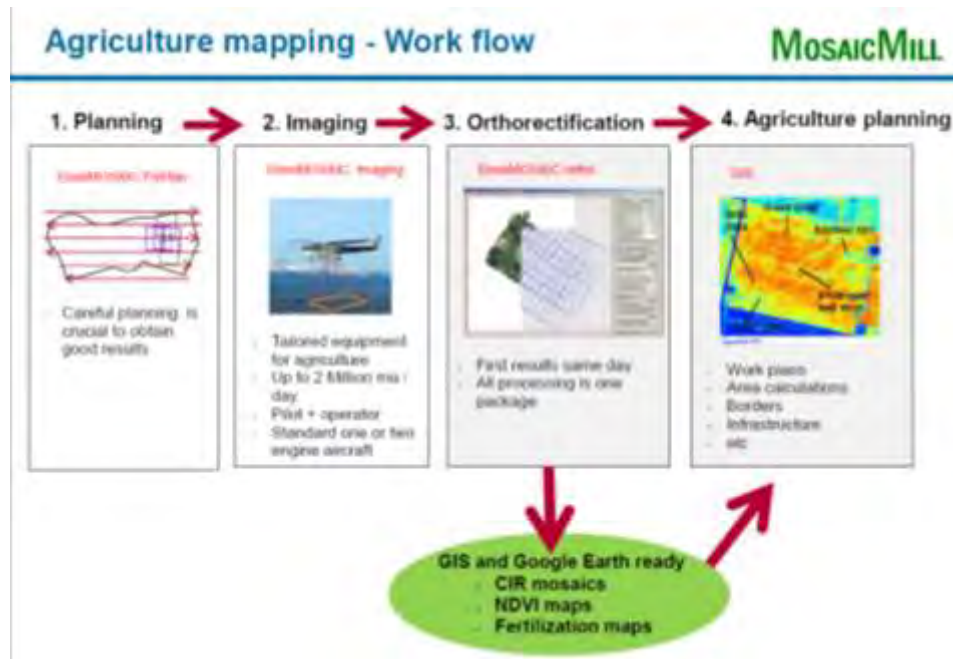


Figura 5.15 Etapas para la obtención de índices de vegetación (www.enzomosaic.com)

La ventaja de los productos que se obtiene de un vuelo, como materia prima es que, esa información puede ser destinada a diversos usos y reúsos; por ejemplo en la **Figura 5.16**, se observa el producto de la imagen con los índices de vegetación, idealmente muestra estrés hídrico y en consecuencia la posibilidad de planear la aplicación de un riego discretizada en el espacio.

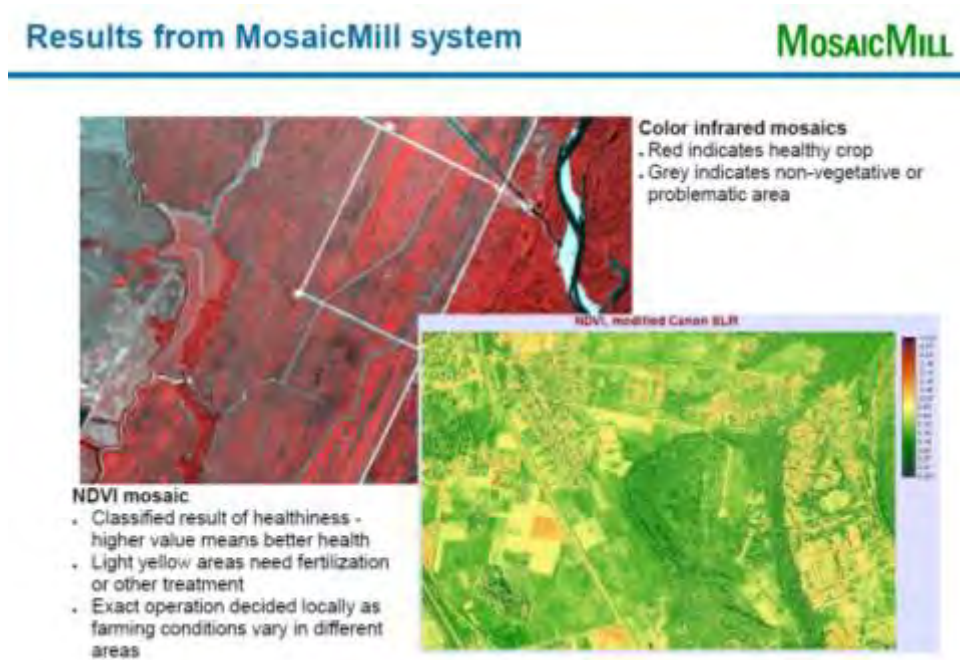


Figura 5.16 Índices de vegetación como resultado de las imágenes (www.enzomosaic.com)

El riego no es la única aplicación de la combinación de bandas, mediante la cámara multispectral pueden detectarse deficiencias nutrimentales, y en general detección de áreas mediante el cual se presume un mejor manejo agrícola (Figura 5.17).

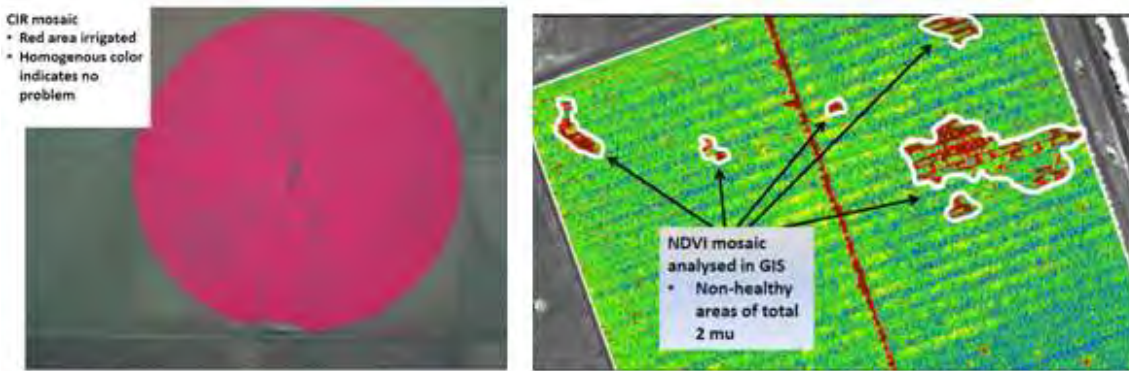


Figura 5.17 Control del riego mediante VANTs (www.enzomosaic.com)

5.3.2. WWW.DRONEMAPPER.COM

Otra empresa en línea es Dronemapper, en cuyo portal ofrece una diversidad de servicios, principalmente en el área ingenieril, mediante el uso de VANTS (**Figura 5.18**), sin embargo se ha insistido en la flexibilidad de la información una vez recabada con el VANT, por lo que este tipo de plataformas también supone una ventaja y posibles aplicaciones a la ingeniería hidroagrícola.



Figura 5.18 Servicios ingenieriles usando VANTs. (www.dronemapper.com)

Desde el punto de vista de imágenes espectrales, la compañía Dronemapper ofrece la posibilidad de trabajar con bandas térmicas, las cuales permiten imágenes posprocesadas con detalles de la superficie mapeada.

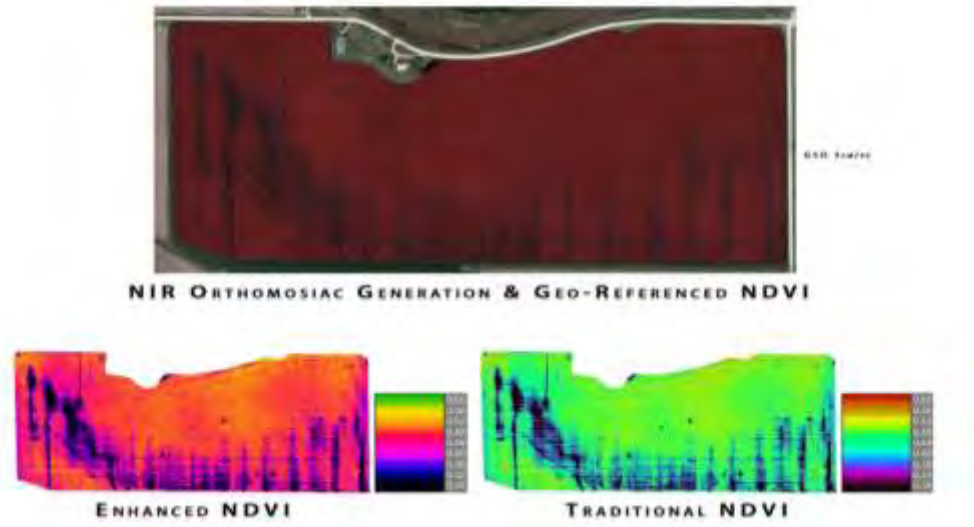


Figura 5.19 Productos que ofrece Dronemapper. (www.dronemapper.com)

6. CONCLUSIONES

- La tecnología VANT está evolucionando de manera exponencial, aportando nuevas aplicaciones no solo para adquisición de imágenes sino también para análisis diverso de datos espacio-temporal.
- El uso de VANT se perfila como una herramienta robusta e imprescindible como apoyo en procesos de planeación, supervisión y estimación de parámetros/variables, de alta variabilidad espacial y temporal, que puedan ser evaluados mediante imágenes, con ventajas de uso de control y seguimiento a distancia, que puede ejecutar procesos eficientes en costo y tiempo.
- En la agricultura de precisión, el uso de VANTs es una herramienta indispensable para la toma de datos espaciales que permite la discriminación de características de terreno relacionados con el uso y manejo de los recursos naturales, insumos, agua y suelo.
- Sin duda, la desventaja principal del uso de VANTs en la agricultura es su precio y las habilidades asociadas a su manejo, no obstante se presenta un abatimiento de los costos y una tendencia sobre el uso cada vez más frecuente de estos dispositivos en aplicaciones agrícolas.
- La perspectiva de esta tecnología, como herramienta auxiliar en la planeación de actividades en agricultura de precisión, apunta a la selección del tipo de dispositivo con el mejor desempeño para los fines específicos de uso y manejo del agua, entrega volumétrica, detección de zonas erosión, índices de vegetación, etc.
- Como se ha documentado en este documento, existe una gran diversidad de aplicaciones de los VANTs en la agricultura y en particular en el diseño, seguimiento, aplicación y evaluación del riego, por lo que el IMTA, en particular la Coordinación de Riego y Drenaje, requiere incorporar este tipo de tecnologías a sus proyectos.
- En resumen las aplicaciones reportadas del uso de VANTs de interés para la agricultura de riego son:
 - Aplicación precisa de agroquímicos, insumos (baja dosis)
 - Estimación de daño por malezas, plagas y enfermedades
 - Altura, grosor y vigor del cultivo
 - Grado de estrés hídrico, térmico y nutricional
 - Estado fitosanitario del cultivo
 - Estimación de propiedades del suelo (humedad, materia orgánica, % arcilla, pH, Salinidad)

Drones y sistemas de información geográfica en la ingeniería hidroagrícola

- Estimación del rendimiento y biomasa y la propiedades del suelo como materia orgánica, humedad, contenido de arcilla y pH
- Generación de modelos digitales de elevación
- Detección de características relevantes de la superficie terrestre
- Estimación de densidad de siembra, plantación
- Estimación del fenología, índice de area foliar, coeficiente de cultivo.
- Supervisión y estado de la infraestructura hidroagrícola, obras, maquinaria

7. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

- Se requiere mantenerse actualizados en el uso de nuevas tecnologías y aplicación, como VANTs y SIG, en las diferentes actividades de los proyectos del IMTA.
- Se requiere ser capaz de adaptar este tipo de herramientas a las necesidades del IMTA, y aprovechar al máximo potencial este tipo de tecnologías.
- Se requiere a corto plazo ajustar metodologías para la aplicación de nuevas tecnologías a las necesidades específicas del IMTA.
- Desde el punto de vista de la agricultura de precisión, la tecnología de los VANTs tiene una amplia gama de aplicaciones, sin embargo su aplicación requiere de una experimentación y validación previa de acuerdo a los fines y condiciones locales.
- Ante el gran avance en el uso de VANTs en agricultura, se requiere mantenerse actualizados para no perderse en la diversidad de equipos, metodologías, sistemas, y aplicaciones.

8. BIBLIOGRAFÍA

8.1. Literatura consultada

- Ambrosia, V.G.; Wegener, S.; Zajkowski, T.; Sullivan, D.V.; Buechel, S.; Enomoto, F.; Hinkley, E.A.; Lobitz, B.; Schoenung, S. 2011. The Ikhana UAS western states fire imaging missions: From concept to reality (2006–2010). *Geocarto Int.*, 26, 85–101.
- Ambrosia, V.G.; Wegener, S.S.; Sullivan, D.V.; Buechel, S.W.; Dunagan, S.E.; Brass, J.A.; Stoneburner, J.; Schoenung, S.M. 2003. Demonstrating UAV-acquired real-time thermal data over fires. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 69, 391–402.
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J. and Fereres, E. 2013. Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, DOI 10.1007/s11119-013-9334-5.
- Blakeslee, R.J.; Croskey, C.L.; Desch, M.D.; Farrell, W.M.; Goldberg, R.A.; Houser, J.G.; Kim, H.S.; Mach, D.M.; Mitchell, J.D.; Stoneburner, J.C. 2003. The Altus Cumulus Electrification Study (ACES): A UAV-Based Science Demonstration. In *Proceedings of International Conference on Atmospheric Electricity*, Versailles, France, 9–13 June; p. 1.
- BOE nº 223 del 15 de septiembre de 2012, páginas 65127-65171. Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios.
- Bowen, D. 1977. *Encyclopedia of War Machines: An Historical Survey of the World's Great Weapons*; Peerage Books: London, UK.
- Cai, G., Lum, K.-Y., Chen, B. M., and Lee, T. H., 2010. “A Brief Overview on Miniature Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles,” in Proc. 8th IEEE International Conf. on Control and Automation, Xiamen, China, pp. 285–290.
- Calderón, R., Navas-Cortés, J.A., Lucena, C. and Zarco-Tejada, P.J. 2013. High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of Verticillium wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, 139: 231–245.
- Carey, B. Small UAS rule will begin phased entry of unmanned aircraft. *Aviation International News Online* 4 October 2011. Available online: <http://www.ainonline.com/?q=aviation-news/aviation-international-news/2011-10-04/small-uas-rule-will-begin-phased-entry-unmanned-aircraft> (accessed on 23 October 2011).
- Castillejo-González, I.L., López-Granados, F., García-Ferrer, A., Peña-Barragán, J.M., Jurado-Expósito, M., Sánchez De La Orden, M. and González-Audicana, M. 2009.

- Object and pixel based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuickBird imagery. *Computers and Electronics in Agriculture* 68: 207-215.
- De Castro, A.I., Jurado-Expósito, M., Peña-Barragán, J.M. and López-Granados, F. 2012. Airborne multi-spectral imagery for mapping cruciferous weeds in cereal and legume crops. *Precision Agriculture*, 13: 302-321.
- De Castro, A.I., López-Granados, F., Peña-Barragán, J.M. And Jurado-Expósito, M. (2013). Broad-scale cruciferous weed patches classification in winter wheat using QuickBird imagery for in-season site-specific control. *Precision Agriculture*, 14: 392-417.
- Department of State. *The International Traffic in Arms Regulations (ITAR)*; US Department of State, Directorate of Defense Trade Controls: Washington, DC, USA, Available online: http://www.pmddtc.state.gov/regulations_laws/itar.html (accessed on 15 February 2012).
- Federal Aviation Administration. *Factsheet: Unmanned Aircraft Systems*; Available online: <http://www.faa.gov/about/initiatives/uas/> (accessed on 15 February 2012).
- Federal Aviation Administration. *Unmanned Aircraft Operations in the National Airspace System*; Federal Register: Washington, DC, USA, 2007; Volume 72, pp. 6689–6690.
- Federal Aviation Administration. *Unmanned Aircraft Operations in the National Airspace System (NAS)*; Federal Aviation Administration Air Traffic Organization Policy Notice N JO 7210.766; US Dept. of Transportation: Washington, DC, USA, 2011; pp. 1–12.
- García, V. J. A., Vázquez, A. L. A. 2011. Los robots en el sector agrícola. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de automática. Ingeniería electrónica e informática industrial. Madrid. España. *Int. J. Control Autom. Syst.* (1), 36–44, (2010).
- García-Ruiz, F., Sankaran, S., Maja, J.M., Lee, W.S., Rasmussen, J and Eshani, R. 2013. Comparison of two aerial imaging platforms for identification og Huanglongbing-infected citrus trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, 91: 106-115.
- Gómez-Candón, D., De Castro-Megías, A.I. and López-Granados, F. 2012. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes. *Precision Agriculture*, DOI 10.1007/s11119-013-9335-4.
- González-Dugo, V., Zarco-Tejada, P.J., Nicolás, E., Nortes, P. A., Alarcón, J. J., Intrigliolo, D. S. and Fereres, E. 2013. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture*, 14: 660–678.
- Grady, M. Coming soon: Era of UAS? *AVflash News* 15 February 2012. Available online: http://www.avweb.com/avwebflash/news/ComingSoonEraOfUAS_206186-1.html (accessed on 15 February 2012).

- Hannavy, J., Ed. 2007. *Encyclopedia of Nineteenth-Century Photography*; Routledge, Taylor & Francis Group: 2007; Volume 1, pp. 14–15.
- Haydon, F.S. Aeronautics in the Union and Confederate Armies, With a Survey of Military Aeronautics Prior to 1861. In *Military Ballooning During the Early Civil War*; Johns Hopkins University Press: Baltimore, MD, USA, 2000; Volume 1.
- Hengl, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 32: 1283–1298.
- Huang, Y., Thomson, S.J., Hoffmann, W.C., Lan, Y. and Fritz, B.K. 2013. Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6: 1-10.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. 1981. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45–55.
- Jiménez-Díaz, R.M., Cirulli, M., Bubici, G., Jiménez-Gasco, L.M., Antoniou, P.P. and Tjamos, E.C. 2012. Verticillium wilt, a major threat to olive production: Current status and future prospects for its management. *Plant Disease*, 96: 304–329.
- Kaestner, R.; Thrun, S.; Montemerlo, M.; Whalley, M. 2006. A Non-Rigid Approach to Scan Alignment and Change Detection Using Range Sensor Data. In *Field and Service Robotics: Results of the 5th International Conference STAR 25*; Cooke, P.I., Sukkarieh, S., Eds.; Springer-Verlaag: Berlin, Germany; pp. 179–194.
- López-Granados F., Jurado-Expósito M., Peña-Barragán, J.M. and García-Torres L. 2005. Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. *European Journal of Agronomy*, 23:279-289.
- López-Granados, F. 2011. Weed detection for site-specific weed management: mapping and real time approaches. *Weed Research*, 51:1-11.
- López-Granados, F., Jurado-Expósito, M., Peña-Barragán, J.M. and García-Torres, L. 2006. Using remote sensing for identification of late-season grass weed patches in wheat. *Weed Science*, 54: 346-352.
- Mercado-Blanco, J., Rodríguez-Jurado, D., Parrilla-Araujo, S. and Jiménez-Díaz, R. M. 2003. Simultaneous detection of the defoliating and nondefoliating *Verticillium dahlia* pathotypes in infected olive plants by duplex, nested polymerase chain reaction. *Plant Disease*, 87: 1487–1494.
- Merlin, P. Ikhana. 2009. Unmanned Aircraft System: Western States Fire Missions. In *NASA Monographs in Aerospace History #44 SP-2009-4544*; NASA: Washington, DC, USA; pp. 1–70.
- Navas-Cortés, J. A., Landa, B. B., Mercado-Blanco, J., Trapero-Casas, J. L., Rodríguez-Jurado, D. and Jiménez-Díaz, R. M. 2008. Spatiotemporal analysis of spread of infections by

- Verticillium dahliae* pathotypes within a high tree density olive orchard in southern Spain. *Phytopathology*, 98: 167–180.
- Nyquist, J.E. 1997. Unmanned aerial vehicles that even geoscience departments can afford. *Geotimes*, 42, 20–23.
- Peña-Barragán, J.M., López-Granados F., García-Torres L., Jurado-Expósito M., Sánchez De La Orden M. and García-Ferrer A. 2008. Discriminating cropping systems and agri-environmental measures by remote sensing. *Agronomy for Sustainable Development*, 28: 355- 362
- Peña-Barragán, J.M., López-Granados, F., Jurado-Expósito, M. and García-Torres, L. 2007. Mapping *Ridolfia segetum* patches in sunflower crop using remote sensing. *Weed Research*, 47: 164-172.
- Peña-Barragán, J.M., López-Granados, L., Jurado-Expósito, M. and García-Torres, L. 2010. Sunflower yield related to multitemporal aerial photography, land elevation and weed infestation. *Precision Agriculture*, 11: 568-585.
- Peña-Barragán, J.M., Ngugi, M.K., Plant, R.E., Six, J. 2011. Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. *Remote Sensing and Environment*, 115: 1301–1316.
- Peña-Barragán, J.M., Torres-Sánchez, J., De Castro-Magías, A.I. and López-Granados, F. 2013. Generating weed maps in early-season maize fields by using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and object-based image analysis. *PLoS One*, e77151.
- Perry, J.H.; Mohamed, A.; El-Rahman, A.H.; Bowman, W.S.; Kaddoura, Y.O.; Watts, A.C. 2008. Precision Directly Georeferenced Unmanned Aerial Remote Sensing System: Performance Evaluation. In *Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting*, San Diego, CA, USA, 28–30 January; pp. 680–688.
- Polski, P. 2004. DHS View of Unmanned Aerial Vehicle Needs. In *Proceedings of AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference*, Chical, IL, USA, 20–23 September.
- Quilter, M.C.; Anderson, V.J. 2001. A proposed method for determining shrub utilization using LA/LS imagery. *J. Range Manage.*, 54, 378–381.
- Reuder, J., Brisset, P., Jonassen, M., Müller, M., and Mayer, S., 2008 “SUMO: A Small Unmanned Meteorological Observer for Atmospheric Boundary Layer Research,” Proc. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., paper 012014.
- Shampine, L. F., 1994. Numerical Solution of Ordinary Differential Equations, Chapman & Hall, New York.
- Stombaugh, T., McLaren, D., and Koostra, B., 2005 “The Global Positioning System,” University of Kentucky Cooperative Extension Circular AEN-88.
- Torres-Sánchez, J., Peña, J.M., de Castro-Megías, A.I. and López-Granados, F. 2013. Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management. *PLoS ONE* 8, e58210.

- Torres-Sánchez, J., Peña, J.M., de Castro-Megías, A.I. and López-Granados, F. 2013. Multi-temporal mapping of vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. Submitted.
- Watts A. C., Ambrosia G. V. and. Hinkley E. A. 2012. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sens.* 2012, 4, 1671-1692; doi:10.3390/rs4061671
- Watts, A.C.; Kobziar, L.N.; Percival, H.F. 2009. Unmanned Aircraft Systems for Wildland Fire Monitoring and Research. In *Proceedings of the 24th Tall Timbers Fire Ecology Conference: The Future of Fire: Public Awareness, Health, and Safety*, Tallahassee, FL, USA, 11–15 January; pp. 86–90.
- Watts, A.C.; Perry, J.H.; Smith, S.E.; Burgess, M.A.; Wilkinson, B.E.; Szantoi, Z.; Ifju, P.G.; Percival, H.F. 2010. Small unmanned aircraft systems for low-altitude aerial surveys. *J. Wildl. Manage.*, 7, 1614–1619.
- Wilkinson, B.E.; Dewitt, B.A.; Watts, A.C.; Mohamed, A.H.; Burgess, M.A. 2009. A new approach for passpoint generation from aerial video imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 75, 1415–1424.
- Yue, J.W., Lei, T.J., Li, C.C. and Zhu J.Q. 2012. The application of unmanned aerial vehicle remote sensing on quickly monitoring crop pests. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 18: 1043-1052.
- Zarco-Tejada, P.J., Berni, J.A.J., Suárez, L., Sepulcre-Cantó, G., Morales, F. and Miller, J.R. 2009. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*, 113: 1262–1275.
- Zhang, C. and Kovacs, J.M. 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13: 693-712.

8.2. Literatura citada

- 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.
- Chad Garland, LA Times: "Drones may provide big lift to agriculture when FAA allows their use" publicado 13 Sep. 2014 en línea: <http://www.latimes.com/business/la-fi-drones-agriculture-20140913-story.html>
- Chao, H., Y. Chen. 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.
- Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees. *Computers and Electronics in Agriculture* 91 (2013) 106–115
- 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.
- 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.
- Forbes: "Growing The Use Of Drones In Agriculture" publicado nov 26, 2013 en línea: <http://www.forbes.com/sites/rakeshsharma/2013/11/26/growing-the-use-of-drones-in-agriculture/>
- Garcia-Ruiz, F., Sindhuja Sankaran, Joe Mari Maja, Won Suk Lee, Jesper Rasmussen, Reza Ehsani. 2013.
- Hang Zhu, Yubin Lan, Wenfu Wu, Clint Hoffmann, Yanbo Huang, Xinyu Xue, Jian Liang and Brad Fitz. *Journal of Bionic Engineering* 7 (2010) 276–283: "Development of a

- PWM Precision Spraying Controller for Unmanned Aerial Vehicles”, publicado por Science Direct (2010), en línea: http://www.afpmb.org/sites/default/files/pubs/dwfp/publications/FY10/Zhu_Controller_UAV_2010.pdf
- Jensen, T., A. Apan, F. Young, L. Zeller. 2007. Detecting the attributes of a wheat crop using digital imagery acquired from a low-altitude platform. *Computers and Electronics in Agriculture* 59:66–77
- 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.
- Moran, M. S., Inoue, Y., & Barnes, E. M. 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*. 61:319-346.
- Moussa-Ouédraogo, M., A. Degré, C. Debouche, J. Lisein. 2014. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. *Geomorphology* 214 (2014) 339–355.
- Mulla, D. J. 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering*. 114:358-371.
- News for the 21st Century Farmer: “Drones hit roadblock on path to become farming tool” publicado julio 27, 2014, en línea: <http://farmingdrones.com/drones-hit-roadblock-on-path-to-become-farming-tool-business/>
- News for the 21st Century Farmer: “Farming Takes Flight Drones Save IL Farmers Time and Money / Public News Service” publicado julio 12, 2014 en línea: <http://farmingdrones.com/farming-takes-flight-drones-save-il-farmers-time-money-public-news-service/>
- Seelan, S. K., Laguetta, S., Casady, G. M., & Seielstad, G. A. 2003. Remote sensing applications for precision agriculture: a learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, 88:157-169.
- Shanahan, J. F., Schepers, J. S., Francis, D. D., Varvel, G. E., Wilhelm, W. W., Tringe, J. M. 2001. Use of remote sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal*. 93:583-589.

- 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.
- 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.
- Zarco-Tejada, P. J., R. Diaz-Varela, V. Angileri, P. Loudjani. 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.
- 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.

8.3. Páginas en internet

Drones: información en línea, <http://www.vatelcom.com.mx/#cc-m-product-10633723678>
MAVinci - Unmanned Aerial Systems. www.mavinci.de Inteligencia artificial y robotica.
www.aibotix.com
Simulador de vuelo, Arducopter Simulation and Tuning <http://jasonshort.com/>
Elevation/Topography Mapping and Drainage <http://www.precisionagriculture.com.au/>

8.4. Programas

DroneMapper Aerial Imagery Processing and GIS Services.
WWW.DRONEMAPPER.COM

EnsoMOSAIC photogrammetry software and hardware for aerial image processing and aerial survey systems. WWW.MOSAICMILL.COM

ANEXOS

Anexo A. Requerimientos para el desarrollo de un proyecto

Lineamientos para un proceso de adopción de tecnología VANT

- Costo, idealmente menor de 5,000 USD.
- Usabilidad: facilidad para la operación y reducir lo más que se pueda los tiempos de aprendizaje.
- Tipo de manejo: considerar la realización de vuelos en la mayoría de los casos dirigidos en forma asistida por el usuario, facilidad en el manejo, maniobrar el vehículo aéreo no tripulado por mando a distancia norte-sur y este-oeste.
- Duración de vuelo (endurance): duración del vuelo de al menos 10 min.
- Techo de vuelo: capacidad para volar a alturas mayores a los 200 m sobre el nivel del terreno.
- Imágenes: capacidad en el dispositivo UAV para montar cámaras de alta resolución (menores de 250 gr).
- Video.
- Resistencia al viento.
- La mayor capacidad de transportación.
- Mantenimiento.
- Capacidad del VANT de diversificar el uso de este vehículo.
- Otros.

Los helicópteros a gasolina, vibran demasiado y por lo tanto la cámara es difícil de estabilizar y tener una imagen nítida, como resultado del combustible (nitro) hay nubosidad (humo) y las fotos no son adecuadas, en cambio los helicópteros eléctricos tienen menos niveles de vibración, sobre todo los pequeños, pero vuelan poco tiempo, alrededor de 10 min. El AIR drone, es muy sencillo de operar (por medio de un iPad) pero no puede modificarse en su cámara fotográfica.

Los multirrotor se perfilan como la mejor alternativa y cumplen con la mayoría de las especificaciones para la realización de vuelos en los que se obtengan productos como fotografía y videos. Algunas características técnicas pertenecientes son: equipo multirrotor, autopiloto, unidad GPS, elementos de montura de batería, sin embargo pueden levantar poco peso e incluso si se incrementa este, el tiempo de vuelo se reduce de 4-5 minutos.

Informe Final RD1407.1
Drones y sistemas de información geográfica en la ingeniería hidroagrícola

Cuadro A.1 Propósito: uso de VANT para realizar agricultura de precisión

REQUERIMIENTO	CARACTERÍSTICAS
Presupuesto disponible para la adquisición de un VANT	\$ 200,000
Presupuesto disponible para la adquisición de elementos asociados	\$ 500,000
Nivel de facilidad de la operación del VANT ¿La organización ya cuenta con personal experimentado? ¿Cuál es el nivel que tiene?	<input type="checkbox"/> Muy alto <input type="checkbox"/> Alto <input checked="" type="checkbox"/> Medio <input type="checkbox"/> Bajo <input type="checkbox"/> Muy Bajo
Tipo de manejo a considerar para la realización de vuelos. La facilidad de maniobrar el vehículo aéreo no tripulado por mando a distancia al norte, sur, este, oeste para mapear zonas de estrés hídrico, erosión, y humedad	<input checked="" type="checkbox"/> Operación automática <input type="checkbox"/> Operación dirigida por operador <input type="checkbox"/> Ambos
Área de mapeo o inspección promedio a volar	_____1000_____HAS
Duración del vuelo considerada como adecuada por la organización	____1 hr_____ minutos
Requerimientos cartográficos	Escala____1:2000_____
Tamaño mínimo de objetos a cartografiar	Foto infrarrojo, interesan colores
	Exactitud posicional: 5 cm

Informe Final RD1407.1
Drones y sistemas de información geográfica en la ingeniería hidroagrícola

REQUERIMIENTO	CARACTERISTICAS
Imágenes en color verdadero	Si
Imágenes en falso color	Si PAR y NIR
Existen especificaciones particulares de resolución en las fotografías	No
Qué tipo de producto cartográfico se va a generar	<p>Fotografías aéreas oblicua</p> <p>x Fotografía aérea de planta</p> <p>Aerofotomosaico georreferenciado</p> <p>Ortofotos</p> <p>Modelos digitales de terreno</p> <p>Calendario de riego, grado de erosión puede ser mapa conceptual</p>
Se tiene la necesidad de generar videos	<p>No</p> <p>Si</p> <p>Formato digital y de apertura:</p> <p>Elementos que deben ser tomadas:</p>

REQUERIMIENTO	CARACTERISTICAS
Se tiene la necesidad de incorporar sensor al VANT	NO SI Sensor de humedad, CO2, T, etc.
Especificar el sitio donde el VANT deberá hacer las mediciones, o los vuelos, con el objetivo de verificar la velocidad de los vientos	
Especificar algunas limitaciones particulares del VAT para transportación. Limitaciones de algún VANT	
Existe la necesidad en el corto o mediano plazo de replicar el VANT. Determinar si el proyecto se replicaría de forma masiva para conocer si se tienen requerimientos de programar trabajo colaborativo	
El VANT va a realizar vuelos sobre zonas con personas o animales	

Esquema metodológico

1. Inicio del proyecto.

a) Definición de los requerimientos.

Involucra cuestiones técnicas, tales como el tiempo que se necesita para llevar a cabo el proceso de medición, y los requerimientos para esto. Cada proyecto específico tiene necesidades claras sobre el modo de vuelo y los dispositivos.

2. Una vez definido las necesidades, se toma la decisión como si es necesario adquirir un VANT.

3. Si la decisión ha sido positiva, es necesario buscar el VANT que va a satisfacer las necesidades descritas en el paso 1. Y antes de cualquier actividad práctica, es necesario

dominar la parte teórica sobre el uso y funcionamiento de este aparato, amén de las características inherentes al proyecto en sí.

El aparato contiene una serie de dispositivos en su conjunto que serán responsables del éxito del proceso de vuelo. Un exhaustivo reconocimiento de cada uno de estos, y su relación con el VANT será parte básica para lograr establecer protocolos paso a paso y de preferencia por etapas, debido al costo y riesgos que existen con el manejo de este tipo de equipos, probará la batería, el funcionamiento de la cámara, que este montada, etc., son una serie de actividades que deben llevarse a cabo, de manera sistemática en cada evento.

- a) Pruebas de vuelo.
- b) Realizar vuelos asistidos.
- c) Adquisición de fotos, videos, etc.
- d) Procesamiento de datos para evaluar.

Cuando la parte teórica ha sido dominada, viene la fase de prueba. Una prueba piloto que permita primeramente familiarizar al usuario con el ambiente, y evaluar la calidad del producto elaborado.

4. Generación de productos.

Cuando se comienzan a tener productos, se está en condiciones de evaluar su calidad y con ello tomar la decisión acerca de mejoras que deban hacerse y nuevas necesidades para satisfacer los huecos detectados. Esto ha de modificar el proceso y por lo tanto se debe regresar a la parte teórica, de estudio y nuevamente a las pruebas piloto.

5. Evaluación de la calidad de los productos.

¿El producto que se está generando es el que satisface las necesidades? La respuesta esto permitirá corregir antes de terminar el proyecto si lo que se está generando va a funcionar. La verificación en tierra será necesaria dependiendo de la precisión y del producto a generar, si se pretende generar una carta topográfica será necesario tener puntos de control en tierra.

Anexo B. Entrenamiento del operador

Es necesaria la adquisición del conocimiento y experiencia en el manejo de situaciones de operación normal, operaciones críticas y operaciones de recuperación; los requerimientos del proyecto, con relación al uso del VANT como baterías cargadas al máximo, para evitar que pueda caer y provocar accidentes; el funcionamiento, los sensores antes, durante y después de la misión de vuelo.

Se considera importante realizar diferentes ejercicios y prácticas en este proceso empleando VANT:

- Manejo de VANT por medio de simuladores básicos.
- Por medio de simuladores profesionales.
- De entrenamiento.
- Conocimiento completo de las características y procesos para la operación de VANT.
- Operación del VANT en forma interactiva.
- Operación del VANT por medio de una ruta GPS y en forma autónoma.
- Operación del VANT en forma mixta.

Para definir puntualmente el tipo de producto es necesario saber y tener claro cuáles son los motivos del vuelo y los objetivos del estudio, pero además los aspectos colaterales, como por ejemplo en una barranca o considerar otras como el recorrido.

La adaptación de una cámara con sensor infrarrojo puede costar alrededor de 1,500 USD- Los GPS usan constelación NAVSTAR y/o GLONASS, lo que permite grabar y programar una ruta de vuelo, para que este sea automática.

El aprendizaje para volar un VANT

1. Aprender con simuladores, para evitar el riesgo de la pérdida de un vehículo, cuyo costo puede ser alto.
2. Simulador base: uno libre de costo se puede localizar en: www.Jasonshort.com donde se tiene la oportunidad de comenzar el proceso de manejo de un VANT, mediante dos palancas, una de ellas es la aceleración mediante el movimiento hacia adelante. Si la palanca se mueve izquierda o derecha, es el giro (yaw).
3. Existe un simulador que se llama fms (flight-model-simulation).
4. Los drones pueden volar entre 30 y 40 min, tener en cuenta para elevación, aterrizaje, etc.
5. Deben atender las cartas aeronáuticas, aun cuando no haya normatividad, deben atender reglas básicas de vuelo, de seguridad para el VANT y para transeúntes.

ArduCopter SIM es un simulador de vuelo que permite obtener una vista previa de todas las características de Arducopter incluyendo Acro, piloto automático, RTL a prueba de fallos, y Auto-Land además que permite trazar cualquier variable en tiempo real para tener una idea de lo que realmente está sucediendo y evitar accidentes o mal desempeño en el campo.

Diversos parámetros se pueden aplicar al simulador con el objetivo de establecer las condiciones más reales al vuelo del VANT. Este simulador permite agregar las siguientes características entre muchas otras (**Figura B.1**):

- Drag Co-Efficient, Air Density, Cross Section: Ajusta el parámetro de la sección transversal hasta que el vehículo vuele a la misma velocidad en la vida real como su helicóptero al mantener un ángulo constante.
- Mass: El peso en gramos del helicóptero.
- Moment of inertia: Un número mayor disminuirá los cambios en la velocidad de rotación.
- Motor Kv: La velocidad del motor sobre la base en un paquete de 11.1 Volt.
- Wind: Elige el rango de velocidad en cm/s y establece el período de oscilación en segundos.
- Start Distance and Altitude: Establece la posición inicial del vehículo al momento de presionar START SIM-
- Start Angle: Establece la ondulación inicial del vehículo al presionar STAR SIM
- Target Distance and Altitude: Establece el siguiente punto de referencia para dos modos de vuelo, mantener altura y libre.



Figura B.1 Menú de ajustes del simulador de vuelo

La dirección y la distancia del siguiente punto de referencia se trazan de forma predeterminada y al reiniciar Sim Copter restablecerá el helicóptero a su posición original. El punto de referencia de destino se muestra de color rojo y la de la localización del helicóptero se muestra como un helicóptero fantasma, esto con la finalidad de ubicar espacialmente el vehículo (**Figura B.2**).

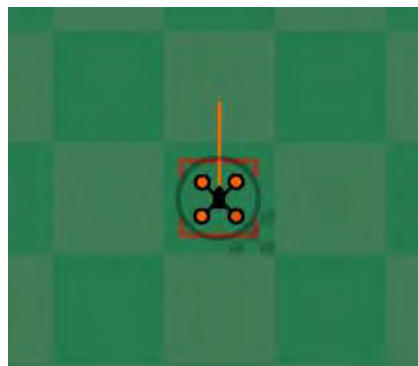


Figura B.2 Ubicación espacial del vehículo

Una vez que se hayan fijado estos parámetros se oprime el botón STAR SIM para iniciar el simulador y controlar el vehículo, con dos palancas, la primera que controla la aceleración y la segunda el giro (**Figura B.3**).

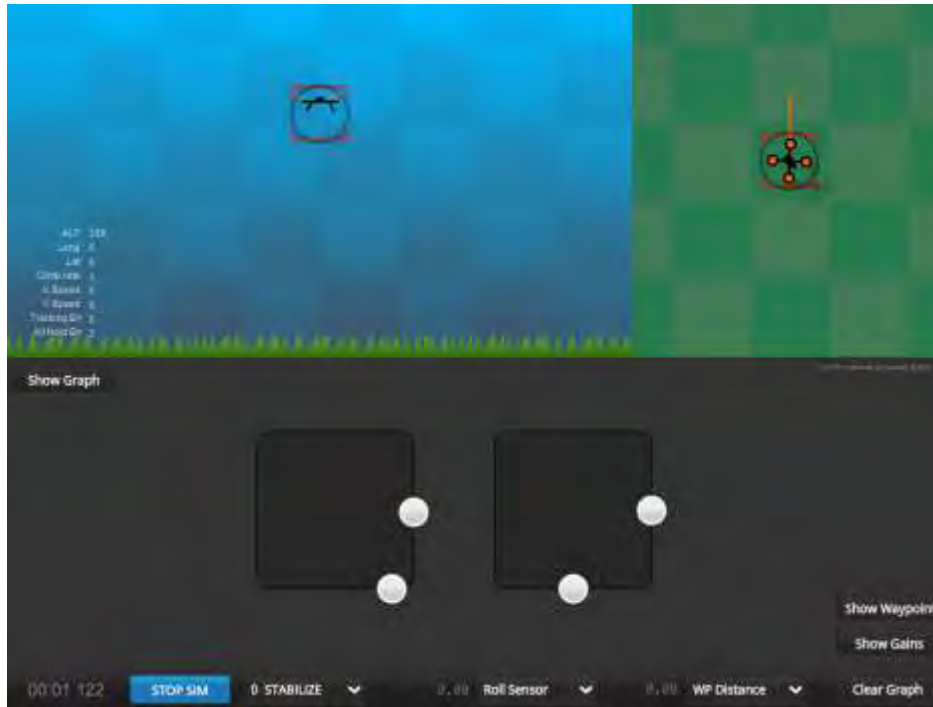


Figura B.3 Manejo del vehículo en el simulador.

Se pueden activar distintas funciones para mejorar y practicar lo distintos modos de vuelo, como aterrizaje, control de altura, vuelo en círculos, etcétera (Figura B.4).



Figura B.4 Modos de vuelo para el simulador.

El simulador de vuelo llamado FMS (Flight-Model-Simulator) permite a los usuarios contar con una buena herramienta para el aprendizaje de vuelo de un VANT (Figura B.5). Algunas características del software son:

- Diferentes modelos de vehículos.
- Interfaz de usuario en 18 lenguajes.
- Los modelos no pueden girar en el suelo.
- Calculo de vuelo más estable (más independiente de la frecuencia de reloj del CPU).
- Mejora el control de la posición del piloto.
- Rutina de calibración para joysticks.
- Detección de colisión 3D completa con todos los objetos en el paisaje
- Resistencia térmica ajustable.



Figura B.5 Flying-model-simulator.

Se puede controlar el vehículo desde el teclado, con las teclas de navegación; dirección, izquierda-derecha, profundidad, arriba-abajo (**Figura B.6**).

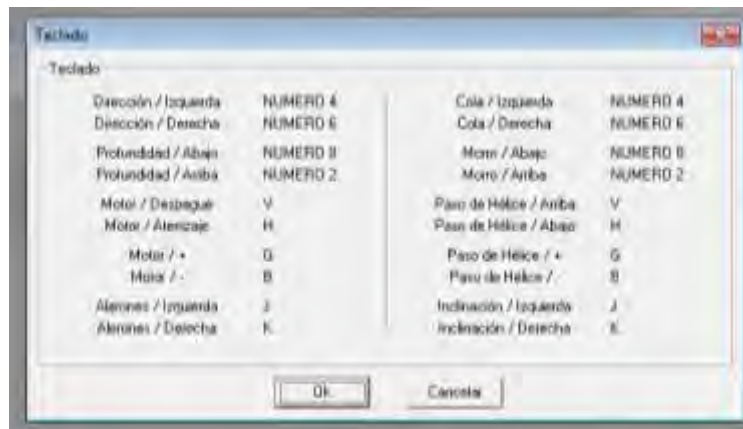


Figura B.6 Controles del vehículo en FMS.

El control del vehículo es amigable, se recomienda un mínimo de 60 horas de vuelo en simulador para poder conocer las implicaciones de realizar vuelos con VANT, dominar el empleo de controles en forma remota y realizar una operación correcta de los vehículos (**Figura B.7**).



Figura B.7 Manejo del vehículo en el simulador.

Anexo C. Descripción de los productos cartográficos usando VANT

Necesidades:

1. Vehículo aéreo no tripulado.
2. Cámara fotográfica digital.
3. Receptor GPS.
4. Programa y equipo de cómputo y elementos de interconexión.

Un multicoptero está compuesto por:

- Descripción del VANT, marca, modelo.
- Armazón, liviano, policarbonato.
- Hélices.
- Motores en las hélices.
- Procesador central, para el plan de vuelo, aterrizaje.
- Servos, para compensar los movimientos verticales y horizontales de la cámara, producto de las variaciones de altitud, por viento, bolsas de aire.
- Baterías.
- Controladores de velocidad.
- Gimbal y espacio para la cámara fotográfica; sistema de compensación de movimientos que permite mantener la cámara lo más horizontal posible.
- Tren de aterrizaje.
- GPS.
- Mando a distancia.
- Estación de control.

La cámara digital:

- Cámaras GOPRO, obtiene fotografías y videos para visualizar, permite hacer trabajos de vigilancia, foto identificación, fotointerpretación. Este tipo de cámara usa lentes ojo de pescado, apertura de 180° (eye fish lens), fácil de operar y adecuadas características para generar fotografía a intervalos de tiempo muy rápido.
- Fotografías para fines cartográficos, algunos modelos son: RICOH GR digital, es el tipo de cámaras que actualmente se usa en vehículos aéreos no tripulados; algunas de las ventajas es que está basado en sistemas de espejos, y por lo tanto permite una mayor maniobrabilidad en su uso y manejo. Nunca hay que dejar desapercibidas las necesidades de peso.

Otro tipo de cámara es la CANON Powershot S11, la cual tiene integrado WiFi.

Cámara Falcon2 color 12m que se utiliza comúnmente para flujos en movimiento, su costo es alrededor de 9,000 pesos.

El sistema Gimbal para usos militares proporciona imágenes transmitidas en tiempo real; su costo oscila alrededor de 10,000 USD.

Puntos importantes a considerar

1. No se recomiendan cámaras integradas en celulares o tabletas, de video o similares, debido a los problemas ya que generan imágenes con problemas asociados a lo que se conoce como "rolling shutters", en el que se introducen artefactos visuales. En general el rolling shutter es la deformación de los objetos, debido a la velocidad de toma de fotos. El otro tipo es global shutter, para tomas de objetos en movimiento, por ejemplo aforo de arroyos.
2. Se recomienda que el lente tenga como característica una longitud focal de 22 mm a 80 mm (bien 30.50 mm). El empleo de la longitud focal debe ser fija durante la misión del vuelo.
3. No se debe de cambiar el zoom.
4. Si la fotografía será sometida a un proceso de mosaikueo o georreferenciación, no se recomienda lente ojo de pescado.
5. Las opciones/funciones de estabilización deben ser cambiadas a off.
6. Las opciones de apertura / ISO.
7. Ruido, genera granulosidad en las imágenes, un ISO 800 permite más luz y distancia focal.
8. Sobre exposición o pobre exposición genera imágenes con el histograma volado en los extremos, lo que devuelve imágenes con problemas para su georreferenciación.

La georreferenciación asistida del VANT con la finalidad de lograr estabilidad del vuelo y generar líneas de vuelo, se integra al GPS para lograr vuelos más fáciles, al tener modo asistido de vuelo. El GPS naza-H, actualmente ha evolucionado.

Para la georreferenciación de fotografía al momento de su toma con 5 cm de error, existen sistemas capaces de tener precisiones, en función de la altura de vuelo, mediante un punto de control con coordenadas y una cámara con GPS. Un ejemplo es el GPS tipo Juno de Trimble (exactitud métrica) o receptores GeoXM de Trimble (exactitud decimal).

Cuando se necesita un modelo de elevación, puede usarse el MD del INEGI y derivado de cartas tipográficas 1:50000; para hacer productos cartográficos, el VANT, la cámara, el GPS, y también el programa de computo Microsoft Image Composite Editor que hace un mosaico más no foto.

Dronemapper, Es una empresa que maquila los proes, se envían las fotos y genera un mosaico.