

Aeronaves remotamente pilotadas e suas aplicações no manejo agrícola e ambiental

Dhonatan Diego Pessi¹

Rodrigo Berger Belin²

Pedro Lopes Miranda Junior³

Normandes Matos da Silva⁴

RESUMO

O objetivo deste estudo foi realizar uma pesquisa bibliográfica da produção científica sobre aeronaves remotamente pilotadas (*remotely piloted aircrafts* – RPAs), popularmente conhecidas como “drones”, relatando aspectos históricos, avanços tecnológicos e as diferentes aplicações no manejo agrícola e ambiental. Inicialmente, a tecnologia de RPAs foi usada em aplicações militares, principalmente na Guerra do Golfo, mas suas primeiras aplicações militares datam da década de 1950, e, na década de 1920, já se projetavam as primeiras RPAs para fins bélicos. Recentemente, tem ocorrido um avanço tecnológico nos sistemas baseados em RPAs, e, a partir do final da década de 1990, suas aplicações não mais ficariam restritas ao uso militar, passando, então, a ser usadas por civis em diversos segmentos de mercado. Os exemplos mais evidentes ocorreram na construção civil, na agricultura e na gestão ambiental. Isso se deve ao fato de as RPA apresentarem imagens aéreas com alta resolução espacial e temporal, complementando, assim, os dados disponibilizados por plataformas de satélite e terrestres. Diversos sensores de altíssima qualidade estão sendo projetados e usados nas RPA. São sensores capazes de medir a temperatura da superfície terrestre, captar a luz infravermelha irradiada pela vegetação e mensurar a altura de elementos presentes na superfície terrestre. O uso de RPA abre um novo caminho para cenários ambientais e agrícolas, especialmente por ser uma ferramenta que possibilita a resposta imediata, a tempo para intervenções rápidas em áreas agrícolas, como também em áreas de reserva legal e de preservação permanente degradadas.

Termos para indexação: drone, gestão ambiental, sensores, sensoriamento remoto.

Remotely piloted aircrafts and their applications in agricultural and environmental management

ABSTRACT

The objective of this study was to perform a bibliographic research of the scientific production about the Remotely Piloted Aircraft (RPA), popularly known as drones, reporting historical aspects, technological advances and the different applications in the agricultural and environmental management. Initially, RPAs technology was used in military applications, particularly in the Gulf War, but its first military applications date back to the 1950s, and by the 1920s the first RPAs were designed for war purposes. Recently there has been technological advancement in systems based on RPAs, and from the late 1990s their applications were no longer be restricted to military use, and they started being used by civilians in various market segments. The main examples occurred

Ideias centrais

- O manejo de plantas daninhas a partir do mapeamento suborbital
- A integração de aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) para sensoriamento remoto e aplicações no gerenciamento de ervas daninhas
- O histórico das diferentes aplicações das aeronaves remotamente pilotadas
- O mercado e suas aplicações de aeronaves remotamente pilotadas

Recebido em
18/10/2019

Aprovado em
08/04/2020

Publicado em
21/08/2020



This article is published in Open Access under the Creative Commons Attribution licence, which allows use, distribution, and reproduction in any medium, without restrictions, as long as the original work is correctly cited.

¹ Bacharel em Ciências Biológicas, doutorando em Tecnologias Ambientais, pesquisador do Núcleo de Pesquisas do Cerrado (Nupec), Rondonópolis, Mato Grosso. E-mail: dhonatan.pessi@gmail.com

² Administrador, mestrando em Gestão e Tecnologia Ambiental, pesquisador do Núcleo de Pesquisas do Cerrado (Nupec), Rondonópolis, Mato Grosso. E-mail: rodrigobergerufmt@gmail.com

³ Engenheiro Agrícola e Ambiental, mestre em Gestão e Tecnologia Ambiental, pesquisador do Núcleo de Pesquisas do Cerrado (Nupec), Rondonópolis, Mato Grosso. E-mail: fuzlopes@gmail.com

⁴ Biólogo, Doutor em Ecologia de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos, professor associado da UFMT, Rondonópolis, Mato Grosso. E-mail: normandes32@gmail.com

in construction, agriculture and environmental management. This is due to the fact that RPAs deliver aerial images with high spatial and temporal resolution, thus complementing the data provided by satellite and terrestrial platforms. There are several very high-quality sensors being designed and used in RPAs. Those sensors are capable of measuring the land surface temperature; capture infrared light radiated by the vegetation; and measure the height of land surface elements. The use of RPA opens a new path for environmental and agricultural scenarios, especially as it is a tool that enables immediate response in time for rapid interventions in agricultural areas, as well as degraded legal reserve and permanent preservation areas.

Index terms: drone, environmental management, sensors, remote sensing.

INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto por meio de aeronaves tripuladas e plataformas de satélite no manejo agrícola e monitoramento ambiental tem sido objeto de pesquisa há mais de 60 anos (Colwell, 1956; Jackson, 1984; Pinter Jr. et al., 2003). Agências governamentais utilizam-se de dados remotamente detectados de satélites no monitoramento ambiental e na produção agrícola (Doraiswamy et al., 2003; Atzberger, 2013). No entanto, algumas demandas, em termos de mapeamento da agricultura de precisão, não foram amplamente adotadas no agronegócio em virtude da carência de resolução espacial das imagens mais refinadas, especialmente para aplicações que exigem escala centimétrica de análise. Outra limitação é a presença de nuvens e a lenta entrega de informações aos usuários finais, para situações que exigem tomadas de decisão ágeis (Jackson, 1984; Pinter Jr. et al., 2003; Mulla, 2013).

Embora o desenvolvimento recente de plataformas de satélites, como Landsat, SPOT5 e QuickBird, em termos de sofisticação de sensores, tenha gradualmente melhorado a resolução espacial de imagens para 30 m, 10 m e até 3 m, ainda é difícil e dispendioso obter essas informações, principalmente quando requeridas para pequenas áreas, como, por exemplo, as de cultivo agrícola, que geralmente são divididas em pequenos talhões, com dezenas ou centenas de hectares (Zhou et al., 2017).

Recentemente, tem ocorrido um avanço tecnológico nos sistemas baseados em RPAs, preenchendo uma lacuna em termos de imagens aéreas com alta resolução espacial e temporal, e complementando, assim, os dados disponibilizados por plataformas de satélite e terrestres (Wan et al., 2018). As RPAs podem realizar voos com frequência, onde e quando necessário, o que permite a observação de padrões espaciais mais definidos em virtude de a sua escala ser menor, permitindo coletar imagens multitemporais para o monitoramento de culturas agrícolas e também de áreas naturais. As vantagens de seu relativo baixo custo financeiro e alta flexibilidade tornam as RPAs populares para estudos de campo (Verger et al., 2014; Gao et al., 2018).

Nos últimos anos, principalmente a partir de 2013 (Baena et al., 2017), as RPAs destacaram-se graças às suas vantagens, fornecendo um novo meio técnico para extrair informação na agricultura e na área ambiental. Os sistemas de aeronaves não tripuladas, que compõem duas nomenclaturas usuais, chamados de aeronave remotamente pilotada (RPA) ou de veículo aéreo não tripulado (Vant), fornecem uma plataforma de sensoriamento remoto com as características de aquisição de dados melhores do que os de satélites convencionais, tais como: alta flexibilidade, facilidade de operação, alta resolução espacial, alta resolução temporal, relativo baixo custo de aquisição, e manutenção e rápida aquisição de dados (Zhang & Kovacs, 2012; Mulla, 2013; Zhang et al., 2014; Deng et al., 2018).

O uso de aeronaves remotamente pilotadas em ecologia e conservação dos recursos naturais tem experimentado grande crescimento na última década (Sandbrook, 2015), além de contar com quantidade crescente de literatura publicada, a qual apoia amplamente o seu uso (Baena et al., 2017). Entre 2013 e 2016, duplicou-se o número de artigos relacionados ao uso de RPA na área da conservação da biodiversidade (Baena et al., 2017). A maioria dos trabalhos publicados sugere que o principal uso de RPA na conservação da biodiversidade seja na contagem e no monitoramento de animais (Marris, 2013; Schiffman, 2014). Entretanto, existem trabalhos de levantamento da composição de plantas

vegetais, as quais desempenham um papel crítico na conservação ambiental e no funcionamento do ecossistema (Reich et al., 2012; Baena et al., 2017; Lu & He, 2017; Van Moorsel et al., 2018).

No contexto da agricultura, o sensoriamento remoto tem sido usado amplamente em trabalhos que envolvem medições sem contato direto com o alvo, por meio da radiação refletida ou emitida de campos agrícolas, cuja intensidade depende de padrões climáticos e das propriedades das plantas que estão sendo investigadas (Mozgeris et al., 2018). Os parâmetros mais comumente estudados são a refletância de luz da superfície das folhas, a transmitância de luz através de folhas e a fluorescência de clorofila e polifenóis (Demotes-Mainard et al., 2008). A técnica do sensoriamento remoto na agricultura consiste em uma estratégia que usa a tecnologia da informação para trazer dados de múltiplas fontes para influenciar as decisões associadas à produção agrícola, sendo, por isso, denominada de agricultura de precisão (Candiago et al., 2015).

Este artigo parte de uma pesquisa bibliográfica da produção científica sobre RPA, nos seus diferentes usos, no manejo agrícola e ambiental, no intuito de facilitar a compreensão do assunto por parte dos pesquisadores, ao mesmo tempo que identifica as asserções sobre os objetos empíricos que estão associados e abordados nesse conjunto de estudos.

SISTEMAS DE AERONAVES NÃO TRIPULADAS

Os sistemas aéreos não tripulados (Unmanned Aircraft Systems – UAS) são sistemas de aeronaves motorizadas, sem a presença de um piloto humano, sendo operados de forma autônoma ou remota por um operador, podendo ser dispensável ou recuperável. Além disso, podem transportar uma variedade de cargas, dependendo do tipo, da funcionalidade, das características operacionais e dos objetivos da missão (Valavanis & Vachtsevanos, 2015).

A Administração da Aviação Federal dos Estados Unidos (FAA) define um UAS como um dispositivo destinado a ser usado em voo, sem possuir um piloto a bordo. Inclui todas as classes de aviões, helicópteros, dirigíveis e aeronaves de sustentação translacional que não tenham piloto a bordo. As aeronaves não tripuladas são apenas as controláveis em três eixos e, portanto, excluem os balões tradicionais (Estados Unidos, 2008).

Existem várias nomenclaturas para descrever aeronaves não tripuladas. Os Veículos Aéreos Não Tripulados (UAV) passaram a ser chamados de Sistemas Aéreos Não Tripulados (UAS), termo preferencialmente usado pela Administração da Aviação Federal dos Estados Unidos (Estados Unidos, 2008). Também são conhecidos como Veículos Remotamente Pilotados (RPV), termo usado na Guerra do Vietnã. Hoje, a Força Aérea dos Estados Unidos substituiu, principalmente o RPV, por Aeronave Remotamente Pilotada, ou RPA, termo usado para incluir tanto a aeronave quanto o piloto (Estados Unidos, 1998), enquanto o Reino Unido designou como Sistema Aéreo Remotamente Pilotado (RPAS), para demonstrar a presença do homem no circuito para controlá-los (Dalamagkidis, 2015).

O surgimento das RPAs e sua finalidade

O surgimento das modernas aeronaves não tripuladas remonta aos primeiros anos da Primeira Guerra Mundial, precisamente ao ano de 1916. O primeiro veículo aéreo não tripulado foi o Hewitt-Sperry Automatic Airplane, cujo nome foi uma homenagem aos dois inventores que o projetaram (Dalamagkidis, 2015). Esse primeiro projeto de aeronave não tripulada consistiu em desenvolver um torpedo aéreo capaz de transportar explosivos até o alvo. É considerado por alguns como um precursor do míssil de cruzeiro (Newcome, 2004). O projeto da aeronave Hewitt-Sperry Automatic Airplane conseguiu atrair, para seus criadores, o interesse da Marinha dos EUA, resultando no desenvolvimento do torpedo aéreo Curtiss-Sperry.

Ao mesmo tempo, a Força Aérea do Exército dos EUA patrocinou o torpedo aéreo Liberty Eagle de Charles Kettering (Zaloga, 2008). Em virtude de problemas técnicos e da falta de precisão do torpedo para a época, o interesse por aviões não tripulados foi menor, mas o potencial de uso de RPAs operadas remotamente para a prática de alvo foi logo percebido (Newcome, 2004; Dalamagkidis, 2015).

Terminada a Segunda Guerra Mundial, aumentou o interesse por missões de reconhecimento por meio do uso de veículos aéreos não tripulados. Os descendentes dos drones de Reginald Denny tornaram-se a base do primeiro drone de reconhecimento – o SD-1 (Newcome, 2004). O MQM-57 Falconer, também conhecido por SD-1, foi desenvolvido em meados da década de 1950, e, no final de sua carreira, foram construídas 1.455 réplicas (National Museum of the United States Air Force, 2009). O SD-1 foi a primeira aeronave remotamente pilotada, com uma câmera embarcada para fazer fotografias aéreas de reconhecimento. Seu voo durava em torno de 30 minutos, quando, então, retornava à base, e era recuperado com o auxílio de um paraquedas (Newcome, 2004; Zaloga, 2008).

Até meados do final do século 20, muitas nações estavam envolvidas em projetos de construção de RPA para o exercício militar, como, por exemplo, a antiga União Soviética, Israel, Canadá, Reino Unido, Alemanha e França (Zaloga, 2008). Muitos modelos foram construídos durante o período da Guerra Fria (Zaloga, 2008), a exemplo dos seguintes: BGM-34C, AQM-34Q, D-21B Tagboard e o primeiro helicóptero não tripulado, o QH-50 (Newcome, 2004). Os sistemas modernos de RPA para uso militar tiveram um grande avanço nos últimos anos, sendo muito mais diversos e complexos que seus precursores. As RPAs militares atuais estão se tornando sistemas de maior resistência, mais capazes e mais avançados do que seus precursores, podendo ter múltiplos papéis, como os que estão disponíveis no MQ-9 Reaper, que, além de fazer o reconhecimento, pode ser usado como um caçador-assassino (Dalamagkidis, 2015).

No início dos anos 1990, as plataformas das RPAs passaram por várias implementações, com sensores para uso civil, as quais foram inicialmente destinadas a pesquisas de instituições federais (Alkaabi & Abuelgasim, 2017). Desde os trabalhos precursores de Smith et al. (1990), ocorreram várias implementações, demonstradas em outros trabalhos (Gutmann & Konolige, 1999; Dissanayake et al., 2001; Guivant & Nebot, 2001; Bosse et al., 2003; Liu & Thrun, 2003). Essas modificações contam com uma série de adaptações de sensores, com diferentes variedades de forma e tamanho, como o RADIO Detecção e Ranging (RADAR), a Detecção de Luz e Alcance (LIDAR) e sensores eletro-ópticos, como câmeras. Tais sensores fornecem uma variedade de observações diferentes do terreno, incluindo o alcance e o rumo (Bryson & Sukkarieh, 2015).

Com o passar dos anos, as RPAs tornaram-se mais acessíveis ao mercado e às pesquisas desenvolvidas por diversas instituições (Bryson & Sukkarieh, 2015; Alkaabi & Abuelgasim, 2017), pois as aplicações das RPAs oferecem grandes oportunidades e fornecem soluções de baixo custo em diversas aplicações (Tabela 1), que geralmente exigem recursos diferentes nas várias tarefas envolvidas (Idries et al., 2015). Existe uma demanda crescente do uso de RPA no mercado para as diversas finalidades civis. Paralelamente ao crescimento dessa demanda, o mercado de RPA também está aumentando (Idries et al., 2015). No setor comercial, a projeção é de que até o ano de 2025 o mercado de RPA deve atingir os 45,8 milhões de dólares (Markets and Markets, 2019).

Tabela 1. Comparação de custos e facilidades de operação das RPAs com outras plataformas aéreas tripuladas e satélites.

	Resolução espacial	Campo de visão	Usabilidade	Capacidade de carga	Custo para aquisição de dados
RPA	5 - 10 cm	50 - 500 m	Muito bom/fácil	Pode ser limitado	Muito baixo
Helicóptero	5 - 50 cm	0,2 - 2 km	Piloto obrigatório	Quase ilimitado	Médio
Avião convencional	0,1 - 2 m	0,5 - 5 km	Piloto obrigatório	Ilimitado	Alto
Satélite	1 - 25 m	10 - 50 km	-	-	Muito alto

Fonte: adaptado de Candiago et al. (2015).

Além disso, estima-se que a partir do ano de 2020, o crescimento anual na produção de RPAs seja de aproximadamente 1 milhão, um crescimento de 117% desde 2017 (Radoglou-Grammatikis et al., 2020). Boa parte desse crescimento pode ser atribuída às grandes RPAs. Muitos países carecem, porém, de recursos e financiamento para adquirir ou fabricar esses sistemas grandes e complexos. O Brasil e a Índia estão formando parcerias para ajudar a construir RPAs, de forma que, em um futuro próximo, possam fabricar sistemas mais caros de forma autônoma (Idries et al., 2015).

As RPAs podem ser utilizadas em muitas aplicações civis graças à facilidade de implantação, ao baixo custo de manutenção, à alta mobilidade e à capacidade de pairar no ar – nesse caso, considerando multirrotores ou híbricos do tipo VTOL (Hayat et al., 2016). Várias são as finalidades pelas quais estão sendo usadas as RPAs. São exemplos disso: monitoramento em tempo real do tráfego rodoviário, sensoriamento remoto, operações de busca e salvamento, entrega de mercadorias, segurança e vigilância, agricultura de precisão e inspeção de infraestrutura civil (Hayat et al., 2016; Shakhathreh et al., 2019). As RPAs oferecem uma grande oportunidade de mercado para fabricantes de equipamentos, investidores e provedores de serviços de negócios. De acordo com Shakhathreh et al. (2019), o mercado das RPAs gera um valor superior a US\$ 127 bilhões anualmente. Entre os mercados que utilizam dessa tecnologia, um dos que mais vêm crescendo nos últimos anos é o da agricultura de precisão, que hoje representa um valor de mercado em torno de US\$ 32,4 bilhões (Shakhathreh et al., 2019).

SENSORES USADOS EM RPAS

Câmeras digitais padrão (RGB) e câmeras modificadas

As câmeras digitais de banda curta, ou câmeras de espectro visível, funcionam com as três bandas do espectro da luz visível à visão humana, conhecidas como RGB, que significa: red (vermelho), green (verde) e blue (azul) (Borra-Serrano et al., 2015). Elas funcionam a cerca de 390 nm a 750 nm de comprimento do espectro da luz (Borra-Serrano et al., 2015; Mejias et al., 2015). Essas categorias de câmeras fotográficas digitais oferecem alta resolução, mas não fornecem fluxo contínuo de imagens (limitação do espaço de memória). A quantidade de imagens que elas podem fornecer vai depender da quantidade de memória de seus cartões, podendo variar de pequena até alta capacidade de armazenamento. Esse tipo de câmera pode ser aplicado em sensoriamento remoto, fotografia panorâmica aérea e fotofilmagem. Porém, as informações extraídas através delas são limitadas quando comparadas com câmeras que possuem sensores de comprimento de onda do não visível, como, por exemplo, o NIR e o RedEdge (Mejias et al., 2015).

Além disso, as câmeras digitais de banda curta usadas no sensoriamento remoto podem variar substancialmente de preço, o que vai depender da qualidade das lentes e dos recursos disponíveis (Lelong et al., 2008; Nguy-Robertson et al., 2016; Crusiol et al., 2017; O'Connor et al., 2017). Por exemplo, o modelo Canon PowerShot S110 de 12MP, câmara muito usada em RPAs, custa a partir de US\$ 180. Já o modelo Sony WX de 18MP custa a partir de US\$ 500. A qualidade da lente afeta a capacidade de resolver diferenças entre os pixels; assim, a quantidade total de pixels em uma câmera é uma boa indicação de que uma imagem terá um bom resultado quanto às diferenças de pixels de uma área amostral qualquer. O preço do equipamento, porém, oscila bastante (Candiago et al., 2015).

As câmeras simples RGB podem ter múltiplas aplicações agrícolas, como, por exemplo, caracterizar as propriedades físicas das plantas e usar as medidas para prever futuros problemas (Ribera et al., 2016), calcular a biomassa de cultivos agrícolas (Khun et al., 2018), estimar a acumulação de nitrogênio em cultivos de arroz (Zheng et al., 2018), mapear ou representar objetos 3D (Mejias et al., 2015) e calcular alguns índices de vegetação (VIs) para estimar a biomassa ou o índice de área foliar (Jordan, 1969; Huete, 1988).

Existe uma diferença entre as câmeras digitais simples e as câmeras modificadas, representada principalmente na forma como as bandas espectrais são criadas. As câmeras digitais têm uma matriz de

filtros coloridos (como um padrão Bayer) cobrindo um único chip de silício; e cada pixel é encaixado pelas outras duas cores do *array* de filtros (Nebiker et al., 2016). Para a formação da imagem, o arquivo de imagem bruto tem que ser desmembrado para se obterem as três bandas espectrais. Um exemplo de câmera modificada é a popular câmera compacta Canon SX230 (Figura 1), com os filtros de cores Bayer modificados. Em vez dos filtros comuns azul, verde e vermelho, o modelo S110 modificada possui filtros para as faixas espectrais verde, vermelho e infravermelho próximo (NIR, 780 nm). Como a separação de cores ocorre diretamente no sensor, através dos filtros da Bayer, a câmera modificada, em vez de ser RGB, torna-se NGR (NIR, Green, Red), com um único sistema de lente (Borra-Serrano et al., 2015; Mahajan & Bundel, 2016; Nebiker et al., 2016).



Figura 1. Câmera modificada com os filtros Red, Green e NIR (RGNIR) modelo Canon SX230.

Foto: Normandes Matos da Silva

A principal vantagem de uma câmera modificada é o que ela pode oferecer, com um baixo custo de investimento (Montes de Oca et al., 2018), com mais versatilidade e capacidade de oferecer dados diferentes daqueles de uma câmera padrão RGB: por exemplo, registrar dados no comprimento da onda do infravermelho próximo (NIR) e da borda do vermelho (RedEdge), aos quais, através dessas faixas do espectro da luz invisível, podem ser aplicados índices de vegetação capazes de indicar a saúde da vegetação. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é muito usado por meio de sensores com a banda NIR, pois reflete fortemente a luz infravermelha próxima (NIR, em torno de 750 nm), enquanto o vermelho e o azul são absorvidos (Lebourgeois et al., 2008; Montes de Oca et al., 2018). Os índices de vegetação e suas aplicações, assim como quais sensores são capazes de calcular, serão discutidos com mais detalhes no capítulo específico sobre índices de vegetação.

Sensores multiespectrais e hiperespectrais

Os sensores multiespectrais normalmente possuem quatro ou mais bandas espectrais, que cobrem grandes faixas de comprimento de onda. Essas câmeras são capazes de capturar, além da radiação vermelha, verde e azul, os comprimentos de onda mais intermediários e ainda mais curtos e longos, pertencentes aos espectros ultravioleta e infravermelho (Montes de Oca et al., 2018). Como resultado, esse tipo de câmera produz imagens de múltiplas bandas, com faixas de comprimento de onda estreitas, capazes de estimar mais precisamente a quantidade de vegetação (Elvidge & Chen, 1995).

Os sensores multiespectrais possuem bandas nas extremidades dos espectros do vermelho – a RedEdge, de 710 nm a 740 nm, e a NIR, de 700 nm a 1.100 nm (José et al., 2014; Montes de Oca et al., 2018). Essas bandas são ótimas para detectar o teor de clorofila-a (Horler et al., 1983). A

refletância de superfície na borda vermelha (Red-Edge) é combinada com refletores vermelhos e NIR para formarem índices fortemente correlacionados ao conteúdo de clorofila (Daughtry et al., 2000; Haboudane et al., 2004; Gitelson et al., 2005; Fitzgerald et al., 2010; Li et al., 2014).

O mercado oferece diversas câmeras multiespectrais usadas em RPAs. A Parrot Sequoia, da empresa SenseFly, conta com cinco bandas: green, red, red-edge, NIR e RGB. Esse sensor já vem incluso na RPA eBee Plus. Outras câmeras multiespectrais também muito usadas são a RedEdge-MX, da MicaSense, que também conta com cinco bandas: blue, green, red, red-edge e NIR, e a Tetracam, que conta com as bandas red, green e NIR (RGNIR) (Figura 2). A RedEdge-MX difere da Sequoia, pois não possui a RGB, mas apenas as bandas de forma separada. Por sua vez, a empresa Tetracam produz diversos sensores, entre os quais, câmeras de 4 a 12 bandas.



Figura 2. Câmera multiespectral Tetracam, com as bandas red, green e NIR.

Foto: Normandes Matos da Silva

Os modelos de sensores hiperespectrais possuem bandas contínuas que cobrem intervalos de comprimento de onda estreitos, com 10 nm a 20 nm de largura (Adão et al., 2017). Esses sensores são cada vez mais usados para medir processos fisiológicos, como a fotossíntese (Freitas et al., 2018). O índice de refletância fotoquímica (PRI) utiliza bandas estreitas em dois comprimentos de onda verdes (531 nm e 570 nm) para rastrear mudanças nos pigmentos de xantofila foliar, em resposta direta a mudanças na taxa fotossintética (Zarco-Tejada et al., 2012; Proctor & He, 2015; Magney et al., 2016; Zhang et al., 2016; Adão et al., 2017).

Os dados hiperespectrais possuem, portanto, um melhor desempenho de perfil de materiais finais graças aos seus espectros quase contínuos. Abrange, por exemplo, detalhes espectrais que podem passar despercebidos em dados multiespectrais, devido à sua natureza discreta e esparsa (Adão et al., 2017). Um dos campos de aplicação mais promissores é a agricultura de precisão, em que imagens hiperespectrais são usadas para coletar dados de sementes e determinar a germinação de sementes de plantas (Nansen et al., 2015). Essa tecnologia também pode ser usada para detectar defeitos internos em produtos alimentícios (Zhang et al., 2015). Outra aplicação é em biotecnologia, para estudos de coral (Barott et al., 2009) e células (Polerecky et al., 2009). É também amplamente utilizado para análise de bactérias (Bachar et al., 2008; Kühl & Polerecky, 2008) e em aplicações de monitoramento ambiental, que permitem medir as emissões de CO₂ na superfície, mapear formações hidrológicas e rastrear os níveis de poluição (Keith et al., 2009; Spangler et al., 2010).

Sensores térmicos

O uso de sensores térmicos em RPA ainda não é comum por causa, principalmente, do seu alto custo e do peso e tamanho desses sensores, requerendo, para tanto, RPAs capazes de suportá-los (Sheng et al., 2010; Hunt Jr. & Daughtry, 2018). É escassa a literatura sobre usos de sensores térmicos na agricultura, em comparação com a literatura sobre outros sensores utilizados nessa área (Hunt Jr. & Daughtry, 2018). A radiação *Thermal InfraRed* (TIR) refere-se a ondas eletromagnéticas com comprimento de onda de 3,5 μm a 20 μm . O infravermelho de onda média (3 μm a 8 μm) e o infravermelho de onda longa (8 μm a 15 μm) estão dentro da região do TIR (Sheng et al., 2010).

Os sensores térmicos podem ser usados em várias aplicações de sensoriamento remoto (Sheng et al., 2010), que incluem: captura de imagens da refletância e da temperatura da vegetação (Berni et al., 2009), parametrização das condições de umidade da superfície terrestre (Soer, 1980), mapeamento da descarga de águas subterrâneas submarinas (SGD) em zonas costeiras (Lee et al., 2016), monitoramento da saúde florestal (Smigaj et al., 2015), simulações de troca de energia da paisagem ao longo do espaço e escalas de tempo (Quattrochi & Luvall, 1999), inferência do teor superficial de água no solo e cobertura vegetal fracionada (Carlson et al., 1994), determinação da evapotranspiração em áreas com vegetação (Caselles et al., 1992) e avaliação do efeito de ilhas de calor urbana (Lo et al., 1997).

RPA na agricultura de precisão

Os primeiros trabalhos desenvolvidos na agricultura com o uso de RPA remontam aos primeiros anos da década de 1980, quando alguns autores publicaram pesquisas sobre fotografias tomadas de veículos remotamente pilotados em periódicos de sensoriamento remoto (Hunt Jr. & Doughtry, 2018), como, por exemplo, Wester-Ebbinghaus (1980) e Tomlins & Lee (1983). Em decorrência de problemas na análise de dados para o manejo de culturas através dos satélites Landsat 1, 2 e 3, Jackson & Youngblood (1983) e Youngblood & Jackson (1983) propuseram a construção de uma plataforma não tripulada de alta altitude dedicada ao sensoriamento remoto agrícola” (Hunt Jr. & Doughtry, 2018).

Após as primeiras pesquisas acerca do uso de RPA na agricultura, outros tantos estudos examinaram uma ampla variedade de plataformas passíveis de serem aplicadas na agricultura, como, por exemplo, dirigíveis cheios de hélio (Inoue et al., 2000), um modelo de asa-fixa (Quilter & Anderson, 2000), pequenos helicópteros controlados por rádio (Hongoh et al., 2001) e paraquedas motorizados (Moran et al., 2001). Em resumo, já faz muito tempo que os cientistas reconhecem as contribuições que a RPA pode dar ao sensoriamento remoto agrícola (Hunt Jr. & Doughtry, 2018).

A Associação de Sistemas de Veículos Não Tripulados Internacional (AUVSI) prevê que 80% das RPAs concedidos pela FAA nos EUA serão usados na agricultura. Em comparação com outras plataformas de sensoriamento remoto, como satélites e aeronaves tripuladas, as RPAs podem ser implantadas facilmente e têm menor custo operacional, tornando-se uma ferramenta promissora para o monitoramento frequente de locais de pesquisa agrícola e campos dos agricultores (Shafian et al., 2018).

As principais áreas de pesquisa na agricultura de precisão são: sensoriamento remoto (Xiang & Tian, 2011; Torres-Sánchez et al., 2013; Zarco-Tejada et al., 2013; Tokekar et al., 2016; Alsalam et al., 2017; Arroyo et al., 2017; Santesteban et al., 2017; Allred et al., 2018), mapeamento (Torres-Sánchez et al., 2015; Christiansen et al., 2017; Santesteban et al., 2017; Allred et al., 2018) e monitoramento (Doering et al., 2014; Agüera Vega et al., 2015; Jannoura et al., 2015; Long et al., 2016; Noriega & Anderson, 2016). Não é, ainda, usado em várias áreas, como a semeadura e a colheita. Além disso, atualmente, a pesquisa de sua aplicação na irrigação e no controle de pragas está aumentando (Albornoz & Giraldo, 2017; Faiçal et al., 2017; Romero et al., 2018). O sensoriamento remoto é, particularmente, a tarefa de pesquisa mais amplamente utilizada através das RPAs agrícolas. É uma tarefa básica obtida anexando-se hardwares (sensores) ou controladores adicionais, conforme for a necessidade.

As RPAs mais usadas na agricultura são principalmente do tipo de asa-fixa (Zarco-Tejada et al., 2013; Allred et al., 2018) ou rotorcraft, conhecida também por multi-helicóptero, ou, ainda, por multirrotor (Shi et al., 2016). Ambas as classes de veículos possuem características únicas que as tornam úteis para aplicações agrícolas (Shi et al., 2016). Como os multirrotores podem decolar e pousar verticalmente (VTOL), os requisitos de espaço para decolagem e pouso são pequenos. Apresenta, porém, um problema, que é o baixo tempo de voo, decorrente das características das baterias utilizadas (Ju & Son, 2018). Uma das maneiras de se resolver esse problema é usar vários RPAs ou várias baterias (Franchi et al., 2012; Lee et al., 2013). Na Figura 3, é mostrado um modelo de RPA multirrotor X800, da empresa brasileira XFLY, de custo médio no mercado dos RPAs, que varia em torno de US\$ 4.000 a US\$ 6.000. Na Figura 4, é apresentado o Phantom 4 Pro, da empresa DJI, que é muito usado por conta do seu baixo custo (uma variação entre US\$ 800 e US\$ 1.500) de mercado e da sua versatilidade. Ele também é classificado como multirrotor.



Figura 3. RPA multirrotor modelo X800, da empresa brasileira XFLY.

Foto: Normandes Matos da Silva



Figura 4. RPA multirrotor modelo Phantom 4 Pro, da empresa DJI.

Foto: Normandes Matos da Silva

Contrapondo-se às RPAs multirrotores, as RPAs de asa-fixa são equipadas com asas, o que torna o equipamento capaz de mapear áreas maiores, cobrindo longas distâncias (Ju & Son, 2018). Os equipamentos de asa-fixa apresentam, porém, algumas desvantagens. Uma delas é a necessidade de uma pista ou lançador para decolagem e aterrissagem. Outra limitação dos equipamentos de asa-fixa está no fato de eles requererem que o ar se mova sobre suas asas para gerar sustentação, permanecendo em um movimento de avanço constante, e não podem permanecer estacionários da mesma maneira que um multirrotor (Ju & Son, 2018). A Figura 5 apresenta um modelo de asa-fixa, o Echar, da empresa brasileira XMobots, muito usado em pesquisas de campo e na agricultura.



Figura 5. Echar da XMobots, RPA de asa-fixa.

Foto: Normandes Matos da Silva

Independentemente da classe de RPA usada, uma gama de sensores personalizáveis está disponível no mercado para ser integrada/acoplada às RPAs multirrotores e/ou asa-fixa nos estudos agrícolas. Esses sensores podem ser câmeras digitais comuns de prateleira, conhecidas por câmeras de banda curta RGB (Xiang & Tian, 2011), câmeras multiespectrais de banda larga personalizadas (Lelong et al., 2008; Valasek et al., 2016), sistemas de imagens hiperespectrais (Uto et al., 2013) e câmeras térmicas (Gonzalez-Dugo et al., 2013). Na agricultura de precisão, esses sensores são utilizados para desempenhar as mais variadas funções e são capazes de fornecer diversos resultados ao produtor agrícola.

RPA na gestão ambiental

Áreas protegidas são espaços naturais de elevado valor ecológico, que visam salvaguardar a biodiversidade, preservar serviços ecossistêmicos e garantir a integridade do patrimônio natural. A conservação desses ecossistemas requer rotinas de monitoramento ambiental. Porém, a obtenção de recursos financeiros para lidar com uma variedade crescente de atividades relacionadas ao manejo de seus recursos ambientais geralmente é insuficiente (Watson et al., 2014), afetando seriamente a eficácia dos resultados finais dos projetos (Juffe-Bignoli et al., 2014).

As áreas protegidas sujeitas a acordos internacionais e nacionais devem resolver suas responsabilidades adquiridas para manter seu status legal (Gonçalves et al., 2016), ou seja, os projetos de conservação desses espaços devem ser efetivos e perenes. Existe uma demanda por iniciativas econômicas versáteis e práticas para atender a uma disparidade de requisitos que possam garantir a conservação, incluindo uma ampla gama de soluções (Lopoukhine et al., 2012), avanços tecnológicos e métodos ou aplicações inovadoras de tecnologias (Jiménez López & Mulero-Pázmány, 2019).

Na última década, as aeronaves remotamente pilotadas (RPAs), também conhecidas popularmente como drones, têm sido objeto de um crescente interesse na esfera civil e científica, sendo consideradas uma tecnologia disruptiva dentro do sensoriamento remoto (Melesse et al., 2007; Jiménez López & Mulero-Pázmány, 2019), inclusive para os estudos ambientais (Whitehead & Hugenholtz, 2014).

Os drones representam uma estratégia com relativo baixo risco de acidentes e reduzido custo financeiro, para observar, de forma rápida e sistemática, os fenômenos naturais, em alta resolução espaço-temporal (Rodríguez et al., 2012; Jiménez López & Mulero-Pázmány, 2019). Por essas razões, os drones tornaram-se, recentemente, uma grande tendência nas pesquisas sobre a vida selvagem (Linchant et al., 2015; Christie et al., 2016) e no manejo ambiental (Mulero-Pázmány et al., 2014; Chabot & Bird, 2015).

Considerando a ampla gama de possibilidades, não é de surpreender que algumas áreas protegidas estejam adotando drones para várias aplicações. Por exemplo: para monitorar plantas invasoras (Zaman et al., 2011; Knoth et al., 2013; Peña et al., 2013; Hung et al., 2014; Wan et al., 2014; Dvorák et al., 2015; Michez et al., 2016); para documentar a extração ilegal de madeira e mineração (Koh & Wich, 2012); e nos métodos de classificação por altura do dossel (Matese et al., 2017; Martín et al., 2018; Sá et al., 2018; Stroppiana et al., 2018; Viljanen et al., 2018; Ziliani et al., 2018), inclusive para identificar plantas de interesse por meio de imagens suborbitais. Recentemente, uma equipe de cientistas descobriu, usando drones, um *hotspot* de biodiversidade (Jiménez López & Mulero-Pázmány, 2019), o que poderia representar um procedimento conveniente para expandir adequadamente as áreas protegidas, conforme estabelecido pelo *Aichi Target 11* (Juffe-Bignoli et al., 2014).

Estamos testemunhando um desenvolvimento contínuo de drones sofisticados e métodos engenhosos que visam a ações específicas de conservação, como o combate a incêndios florestais (Krull et al., 2012; Merino et al., 2012; Zhang et al., 2015) e o plantio de sementes para reflorestamento (Fortes, 2017). O ritmo acelerado dos avanços tecnológicos e das novas aplicações provavelmente excedeu as expectativas anteriores, mas também dá origem a circunstâncias singulares, que devem ser colocadas no contexto da administração (Jiménez López & Mulero-Pázmány, 2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora os veículos remotamente pilotados tenham sido destinados, num primeiro momento, a fins militares, essas aeronaves passaram, ao longo do tempo, a ser utilizadas em aplicações civis, a exemplo do seu uso associado à visão computacional na agricultura de precisão e na gestão ambiental. Em terras americanas e europeias, a RPA já vem sendo utilizada em situações diversas, em atividades agrícolas e ambientais, gerando imagens de melhor qualidade do que as produzidas por satélites, e com preços mais atraentes. Conta, para tanto, com o auxílio da visão computacional para a análise e a tomada de decisão, atuando, assim, como agente maximizador.

No Brasil, o uso de RPA na agricultura e no monitoramento ambiental vem crescendo a cada ano, demonstrando ser um equipamento eficiente. Instituições públicas reconheceram nessa tecnologia uma possibilidade de dinamizar suas ações nas áreas de pesquisa, inovação e fiscalização, enquanto o setor privado identificou diversas oportunidades de ganhos produtivos e financeiros, em diversos setores, tais como engenharias, agronegócio e regularização ambiental.

Aeronaves remotamente pilotadas estão abrindo novas perspectivas de aplicação antes não possíveis. Sua flexibilidade, seu custo, sua precisão e sua curta janela de tempo fazem delas um meio atrativo para usuários finais. Nos últimos anos, a aplicação desse equipamento em pesquisas científicas e no mercado privado aumentou muito, por conta, principalmente, do custo acessível e dos benefícios gerados por essa tecnologia. A tendência para os próximos anos é diversificar suas aplicações, graças a novos sensores, capazes de fornecer dados necessários à tomada de decisão ambiental e agrícola.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) do Brasil, código de financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – processos nº 441975/2018-6 e nº 315170/2018-2.

REFERÊNCIAS

- ADÃO, T.; HRUŠKA, J.; PÁDUA, L.; BESSA, J.; PERES, E.; MORAIS, R.; SOUZA, J.J. Hyperspectral Imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. **Remote Sensing**, v.9, art.1110, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9111110>.
- AGÜERA VEGA, F.; CARVAJAL RAMIREZ, F.; PÉREZ SAIZ, M.; ORGAZ ROSÚA, F. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. **Biosystems Engineering**, v.132, p.19-27, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.01.008>.
- ALBORNOZ, C.; GIRALDO, L.F. Trajectory design for efficient for crop irrigation with a UAV. In: IEEE COLOMBIAN CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL, 3., Cartagena, 2017. **Proceedings**. Cartagena: IEEE, 2017. p.1-6. Editors Diego Patino and Eugenio Yime. 3rd CCAC. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCAC.2017.8276401>.
- ALKAABI, K.; ABUELGASIM, A. Applications of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology for Research and Education in UAE. **International Journal of Social Sciences Arts and Humanities**, v.5, p.4-11, 2017.
- ALLRED, B.; EASH, N.; FREELAND, R.; MARTINEZ, L.; WISHART, D. Effective and efficient agricultural drainage pipe mapping with UAS thermal infrared imagery: a case study. **Agricultural Water Management**, v.197, p.132-137, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.11.011>.
- ALSALAM, B.H.Y.; MORTON, K.; CAMPBELL, D.; GONZALEZ, F. Autonomous UAV with vision based on-board decision making for remote sensing and precision agriculture. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2017, Big Sky. **Proceedings**. Big Sky: IEEE, 2017. p.1-12. DOI: <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943593>.
- ARROYO, J.A.; GOMEZ-CASTANEDA, C.; RUIZ, E.; DE COTE, E.M.; GAVI, F.; SUCAR, L.E. Assessing nitrogen nutrition in corn crops with airborne multispectral sensors. In: BENFERHAT, S.; TABIA, K.; ALI, M. (Ed.). **Advances in Artificial Intelligence: from theory to practice**. Cham: Springer, 2017. p.259-267. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-60045-1_28.
- ATZBERGER, C. Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing**, v.5, p.949-981, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs5020949>.
- BACHAR, A.; POLERECKY, L.; FISCHER, J.P.; VAMVAKOPOULOS, K.; BEER, D. de; JONKERS, H.M. Two-dimensional mapping of photopigment distribution and activity of chloroflexus-like bacteria in a hypersaline microbial mat. **FEMS Microbiology Ecology**, v.65, p.434-448, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00534.x>.
- BAENA, S.; MOAT, J.; WHALEY, O.; BOYD, D.S. Identifying species from the air: UAVs and the very high resolution challenge for plant conservation. **PLoS ONE**, v.12, e0188714, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188714>.
- BAROTT, K.; SMITH, J.; DINSDALE, E.; HATAY, M.; SANDIN, S.; ROHWER, F. Hyperspectral and physiological analyses of coral-algal interactions. **PLoS ONE**, v.4, e8043, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008043>.
- BERNI, J.A.J.; ZARCO-TEJADA, P.J.; SUÁREZ, L.; FERERES, E. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.47, p.722-738, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457>.
- BORRA-SERRANO, I.; PEÑA, J.M.; TORRES-SÁNCHEZ, J.; MESAS-CARRASCOSA, F.J.; LÓPEZ-GRANADOS, F. Spatial quality evaluation of resampled Unmanned Aerial Vehicle-Imagery for weed mapping. **Sensors**, v.15, p.19688-19708, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150819688>.
- BOSSE, M.; NEWMANN, P.; LEONARD, J.; SOIKA, M.; FEITEN, W.; TELLER, S. An Atlas framework for scalable mapping. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2003, Taipei. **Proceedings**. Piscataway: IEEE, 2003. v.2, p.1899-1906.
- BRYSON, M.; SUKKARIEH, S. Inertial sensor-based simultaneous localization and mapping for UAVs. In: VALAVANIS, K.P.; VACHTSEVANOS, G.J. (Ed.). **Handbook of Unmanned Aerial Vehicles**. Dordrecht: Springer, 2015. p.401-430. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_5.
- CANDIAGO, S.; REMONDINO, F.; GIGLIO, M. de; DUBBINI, M.; GATTELLI, M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. **Remote Sensing**, v.7, p.4026-4047, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70404026>.

- CARLSON, T.N.; GILLIES, R.R.; PERRY, E.M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. **Remote Sensing Reviews**, v.9, p.161-173, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1080/02757259409532220>.
- CASELLES, V.; SOBRINO, J.A.; COLI, C. On the use of satellite thermal data for determining evapotranspiration in partially vegetated areas. **International Journal of Remote Sensing**, v.13, p.2669-2682, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169208904071>.
- CHABOT, D.; BIRD, D.M. Wildlife research and management methods in the 21st century: where do unmanned aircraft fit in? **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v.3, p.137-155, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1139/juvs-2015-0021>.
- CHRISTIANSEN, M.P.; LAURSEN, M.S.; JORGENSEN, R.N.; SKOVSEN, S.; GISLUM, R. Designing and testing a UAV mapping system for agricultural field surveying. **Sensors**, v.17, art.2703, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17122703>.
- CHRISTIE, K.S.; GILBERT, S.L.; BROWN, C.L.; HATFIELD, M.; HANSON, L. Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a transformative technology. **Frontiers in Ecology and Environment**, v.14, p.241-251, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/fee.1281>.
- COLWELL, R. Determining the prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography. **Hilgardia**, v.26, p.223-286, 1956. DOI: <https://doi.org/10.3733/hilg.v26n05p223>.
- CRUSIOL, L.G.T.; NANNI, M.R.; SILVA, G.F.C.; FURLANETTO, R.H.; GUALBERTO, A.A. da S.; GASPAROTTO, A. de C.; PAULA, M.N. de. Semi professional digital camera calibration techniques for Vis/NIR spectral data acquisition from an Unmanned Aerial Vehicle. **International Journal of Remote Sensing**, v.38, p.2717-2736, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264032>.
- DALAMAGKIDIS, K. Definitions and Terminology. In: VALAVANIS, K.P.; VACHTSEVANOS, G.J. (Ed.). **Handbook of Unmanned Aerial Vehicles**. Dordrecht: Springer, 2015. p.43-55. DOI
- DAUGHTRY, C.S.T.; WALTHALL, C.L.; KIM, M.S.; DE COLSTOUN, E.B.; MCMURTREY III, J.E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.74, p.229-239, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9).
- DEMOTES-MAINARD, S.; BOUMAZA, R.; MEYER, S.; CEROVIC, Z.G. Indicators of nitrogen status for ornamental woody plants based on optical measurements of leaf epidermal polyphenol and chlorophyll contents. **Scientia Horticulturae**, v.115, p.377-385, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.10.006>.
- DENG, L.; MAO, Z.; LI, X.; HU, Z.; DUAN, F.; YAN, Y. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: a comparison between different cameras. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.146, p.124-136, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008>.
- DISSANAYAKE, M.; NEWMAN, P.; CLARK, S.; DURRANT-WHYTE, H.; CSORBA, M. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v.17, p.229-241, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1109/70.938381>.
- DOERING, D.; BENENMANN, A.; LERM, R.; FREITAS, E.P. de; MULLER, I.; WINTER, J.M.; PEREIRA, C.E. Design and optimization of a heterogeneous platform for multiple UAV use in precision agriculture applications. **IFAC Proceedings**, v.47, p.12272-12277, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02261>.
- DORAISWAMY, P.C.; MOULIN, S.; COOK, P.W.; STERN, A. Crop Yield Assessment from Remote Sensing. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.69, p.665-674, 2003. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.665>.
- DVORÁK, P.; MULLEROVÁ, J.; BARTALOS, T.; BRUNA, J. Unmanned Aerial Vehicles for Alien Plant Species Detection and Monitoring. **International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.40-1/W4, p.83-90, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-83-2015>.
- ELVIDGE, C.D.; CHEN, Z. Comparison of broad-band and narrow-band red and near infrared vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.54, p.38-48, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00132-K](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00132-K).
- ESTADOS UNIDOS. Department of the Air Force. **Operational Risk Management (ORM): guidelines and tools**. [Washington], 1998. (Air Force Pamphlet 91-215).
- ESTADOS UNIDOS. Federal Aviation Administration. **Unmanned aircraft systems operations in the U. S. national airspace system**. [Washington], 2008. 18p. Interim Operational Approval Guidance 08-01, 2008.
- FAIÇAL, B.S.; FREITAS, H.; GOMES, P.H.; MANO, L.Y.; PESSIN, G.; CARVALHO, A.C.P.L.F. de; KRISHNAMACHARI, B.; UEYAMA, J. An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.138, p.210-223, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.04.011>.
- FITZGERALD, G.; RODRIGUE, D.; O'LEARY, G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index - the canopy chlorophyll content index (CCCI). **Field Crops Research**, v.116, p.318-324, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.01.010>.
- FORTES, E.P. Seed plant drone for reforestation. **The Graduate Review**, v.2, p.13-26, 2017.

- FRANCHI, A.; SECCHI, C.; SON, H.I.; BULTHOFF, H.H.; GIODANO, P.R. Bilateral teleoperation of groups of mobile robots with time-varying topology. **IEEE Transactions on Robotics**, v.28, p.1019-1033, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2012.2196304>.
- FREITAS, S.; SILVA, H.; ALMEIDA, J.; SILVA, E. Hyperspectral imaging for real-time unmanned aerial vehicle maritime target detection. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v.90, p.551-570, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0689-0>.
- GAO, J.; LIAO, W.; NUYTENS, D.; LOOTENS, P.; VANGHEYTE, J.; PIZURICA, A.; HE, Y.; PIETERS, J. G. Fusion of pixel and object-based features for weed mapping using unmanned aerial vehicle imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.67, 43-53, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.012>.
- GITELSON, A.A.; VIÑA, A.; CIGANDA, V.; RUNDQUIST, D.C.; ARKEBAUER, T.J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v.32, L08403, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>.
- GONÇALVES, J.; HENRIQUES, R.; ALVES, P.; SOUSA-SILVA, R.; MONTEIRO, A.T.; LOMBA, Â.; MARCOS, B.; HONRADO, J. Evaluating an unmanned aerial vehicle-based approach for assessing habitat extent and condition in fine-scale early successional mountain mosaics. **Applied Vegetation Science**, v.19, p.132-146, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/avsc.12204>.
- GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P.; NICOLÁS, E.; NORTES, P.A.; ALARCÓN, J.J.; INTRIGLIOLO, D.S.; FERERES, E. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species with in a commercial orchard. **Precision Agriculture**, v.14, p.660-678, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9322-9>.
- GUIVANT, J.E.; NEBOT, E.M. Optimization of the simultaneous localization and map-building algorithm for real-time implementation. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v.17, p.242-257, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1109/70.938382>.
- GUTMANN, J.-S.; KONOLIGE, K. Incremental mapping of large cyclic environments. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE IN ROBOTICS AND AUTOMATION, 1999, Piscataway. **Proceedings**. [Piscataway: IEEE], 1999. p.318-325. CIRA'1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/CIRA.1999.810068>.
- HABOUDANE, D.; MILLER, J.R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P.J.; STRACHAN, I.B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v.90, p.337-352, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>.
- HAYAT, S.; YANMAZ, E.; MUZAFFAR, R. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v.18, p.2624-2661, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2560343>.
- HONGO, D.; KAJIWARA, K.; HONDA, Y. Developing Ground Truth Measurement System Using RC Helicopter and BRDF Model in Forest Area. In: 22nd ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, SINGAPORE, 22., 2001, Singapore. **Proceedings**. Singapore: AARS, 2001. p.1-6.
- HORLER, D.N.H.; DOCKRAY, M.; BARBER, J. The red edge of plant leaf reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v.4, p.273-288, 1983. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431168308948546>.
- https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_92.
- HUETE, A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p.295-309, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
- HUNG, C.; XU, Z.; SUKKARIEH, S. Feature learning based approach for weed classification using high-resolution aerial images from a digital camera mounted on a UAV. **Remote Sensing**, v.6, p.12037-12054, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs61212037>.
- HUNT JR., E.R.; DAUGHTRY, C.S.T. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? **International Journal of Remote Sensing**, v.39, p.5345-5376, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1410300>.
- IDRIES, A.; MOHAMED, N.; JAWHAR, I.; MOHAMED, F. AL-JAROODI, J. Challenges of developing UAV applications: a project management view. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 5., 2015, Dubai. **Proceedings**. Dubai: IEOM, 2015. p.1-10. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEOM.2015.7093730>.
- INOUE, Y.; MORINAGA, S.; TOMITA, A. A blimp-based remote sensing system for low-altitude monitoring of plant variables: a preliminary experiment for agricultural and ecological applications. **International Journal of Remote Sensing**, v.21, p.379-385, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1080/014311600210894>.
- JACKSON, R.D. Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. **Proceedings SPIE, Remote Sensing: Critical Reviews of Technology**, v.475, p.81-96, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.966243>.
- JACKSON, R.D.; YOUNGBLOOD, J.W. Agriculture's eye in the sky: forever plane could give continuous crop data. **Crop & Soils Magazine**, v.36, p.15-18, 1983.
- JANNOURA, R.; BRINKMANN, K.; UTEAU, D.; BRUNS, C.; JOERGENSEN, R.G. Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. **Biosystems Engineering**, v.129, p.341-351, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.007>.

- JIMÉNEZ LÓPEZ, J.; MULERO-PÁZMÁNY, M. Drones for conservation in protected areas: present and future. **Drones**, v.3, art.10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones3010010>.
- JORDAN, C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v.50, p.663-666, 1969. DOI: <https://doi.org/10.2307/1936256>.
- JOSÉ, B.; NICOLÁS, M.; DANILO, C.; EDUARDO, A. Multispectral NDVI aerial image system for vegetation analysis by using a consumer camera. In: IEEE INTERNATIONAL AUTUMN MEETING ON POWER, ELECTRONICS AND COMPUTING (ROPEC), 2014, Mexico. **Proceedings**. Quito: IEEE, 2014. p.1-45. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2014.7036302>.
- JU, C.; SON, H. Multiple UAV systems for agricultural applications: control, implementation, and evaluation. **Electronics**, v.7, art.162, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics7090162>.
- JUFFE-BIGNOLI, D.; BURGESS, N.D.; BINGHAM, H.; BELLE, E.M.S.; LIMA, M.G. de; DEGUIGNET, M.; BERTZKY, B.; MILAM, A.N.; MARTINEZ-LOPEZ, J.; LEWIS, E.; EASSOM, A.; WICANDER, S.; GELDMANN, J.; VAN SOESBERGEN, A.; ARNELL, A.P.; O'CONNOR, B.; PARK, S.; SHI, Y.N.; DANKS, F.S.; MACSHARRY, B.; KINGSTON, N. **Protected Planet Report 2014**. Cambridge: UNEP-WCMC, 2014. 69p.
- KEITH, C.J.; REPASKY, K.S.; LAWRENCE, R.L.; JAY, S.C.; CARLSTEN, J.L. Monitoring effects of a controlled subsurface carbon dioxide release on vegetation using a hyperspectral imager. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v.3, p.626-632, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.03.003>.
- KHUN, K.; VIGNEAULT, P.; FALLON, E.; TREMBLAY, N.; CODJIA, C.; CAVAYAS, F. Estimating Corn Biomass from RGB Images Acquired with an Unmanned Aerial Vehicle. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 14., 2018, Montreal. **Proceedings**. Monticello: International Society of Precision Agriculture, 2018. p.1-9.
- KNOTH, C.; KLEIN, B.; PRINZ, T.; KLEINRBECKER, T. Unmanned aerial vehicles as innovative remote sensing platforms for high-resolution infrared imagery to support restoration monitoring in cut-over bogs. **Applied Vegetation Science**, v.16, p.509-517, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/avsc.12024>.
- KOH, L.P.; WICH, S.A. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. **Tropical Conservation Science**, v.5, p.121-132, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1177/194008291200500202>.
- KRULL, W.; TOBERA, R.; WILLMS, I.; ESSEN, H.; WAHL, N. von. 2012 International Symposium on Safety Science and Technology Early forest fire detection and verification using optical smoke, gas and microwave sensors. **Procedia Engineering**, v.45, p.584-594, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.208>.
- KÜHL, M.; POLERECKY, L. Functional and structural imaging of phototrophic microbial communities and symbioses. **Aquatic Microbial Ecology**, v.53, p.99-118, 2008. DOI: <https://doi.org/10.3354/ame01224>.
- LEBOURGEOIS, V.; BÉGUÉ, A.; LABBÉ, S.; MALLAVAN, B.; PRÉVOT, L.; ROUX, B. Can Commercial Digital Cameras Be Used as Multispectral Sensors? A Crop Monitoring Test. **Sensors**, v.8, p.7300-7322, 2008. DOI: <https://doi.org/10.3390/s8117300>.
- LEE, D.; FRANCHI, A.; SON, H.I.; HA, C.; BULTHOFF, H.H.; GIORDANO, P.R. Semiautonomous haptic teleoperation control architecture of multiple unmanned aerial vehicles. **IEEE/ASME Transactions Mechatronics**, v.18, p.1334-1345, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2263963>.
- LEE, E.; YOON, H.; HYUN, S.P.; BURNETT, W.C.; KOH, D.-C.; HA, K.; KIM, D.-J.; KIM, Y.; KANG, K. Unmanned aerial vehicles (UAVs)-based thermal infrared (TIR) mapping, a novel approach to assess groundwater discharge into the coastal zone. **Limnology Oceanography: Methods**, v.14, p.725-735, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/lom3.10132>.
- LELONG, C.C.D.; BURGER, P.; JUBELIN, G.; ROUX, B.; LABBÉ, S.; BARET, F. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. **Sensors**, v.8, p.3557-3585, 2008. DOI: <https://doi.org/10.3390/s8053557>.
- LI, F.; MIAO, Y.; FENG, G.; YUAN, F.; YUE, S.; GAO, X.; LIU, Y.; LIU, B.; USTIN, S.L.; CHEN, X. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. **Field Crops Research**, v.157, p.111-123, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.018>.
- LINCHANT, J.; LISEIN, J.; SEMEKI, J.; LEJEUNE, P.; VERMEULEN, C. Are unmanned aircraft systems (UASs) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and challenges. **Mammal Review**, v.45, p.239-252, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/mam.12046>.
- LIU, Y.; THRUN, S. Results for outdoor-SLAM using sparse extended information filters. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2003, Taipei. **Proceedings**. Piscataway: IEEE, 2003. v.1, p.1227-1233.
- LO, C.P.; QUATTROCHI, D.A.; LUVALL, J.C. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, p.287-304, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1080/014311697219079>.
- LONG, D.; MCCARTHY, C.; JENSEN, T. Row and water front detection from UAV thermal-infrared imagery for furrow irrigation monitoring. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS (AIM), 2016, Banff. **Proceedings**. Banff: IEEE, 2016. p.300-305. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIM.2016.7576783>.

- LOPOUKHINE, N.; CRAWHALL, N.; DUDLEY, N.; FIGGIS, P.; KARIBUHOYE, C.; LAFFOLEY, D.; LONDOÑO, J.M.; MACKINNON, K.; SANDWITH, T. Protected areas: providing natural solutions to 21st Century challenges. **Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society**, v.5, p.1-16, 2012.
- LU, B.; HE, Y. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.128, p.73-85, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.011>.
- MAGNEY, T.S.; VIERLING, L.A.; EITEL, J.U.H.; HUGGINS, D.R.H.; GARRITY, S.R. Response of high frequency Photochemical Reflectance Index (PRI) measurements to environmental conditions in wheat. **Remote Sensing of Environment**, v.173, p.84-97, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.013>.
- MAHAJAN, U.; BUNDEL, B.R. Drones for Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), to estimate crop health for precision agriculture: a cheaper alternative for spatial satellite sensors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE RESEARCH IN AGRICULTURE, FOOD SCIENCE, FORESTRY, HORTICULTURE, AQUACULTURE, ANIMAL SCIENCES, BIODIVERSITY, ECOLOGICAL SCIENCES AND CLIMATE CHANGE, 2016, New Delhi. [**Proceedings**]. New Delhi: Jawaharlal Nehru University, 2016. p.38-41. (AFHABEC-2016).
- MARKETS AND MARKETS. **Unmanned Aerial Vehicle (UAV) market by vertical, class, system, industry (defense & security, agriculture, construction & mining, media & entertainment), type, mode of operation, range, point of sale, MTOW and region - global forecast to 2025**. 2019. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/unmanned-aerial-vehicles-uav-market-662.html>>. Acesso em: 11 de agosto de 2020.
- MARRIS, E. Fly, and bring me data. **Nature**, v.498, p.156-158, 2013. DOI: https://doi.org/10.1038/staging_green_ontol_498156a.
- MARTIN, F.-M.; MÜLLEROVÁ, J.; BORGNIET, L.; DOMMANGET, F.; BRETON, V.; EVETTE, A. Using single- and multi-date UAV and satellite imagery to accurately monitor invasive knotweed species. **Remote Sensing**, v.10, art.1662, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10101662>.
- MATESE, A.; DI GENNARO, S.F.; BERTON, A. Assessment of a canopy height model (CHM) in a vineyard using UAV-based multispectral imaging. **International Journal of Remote Sensing**, v.38, p.2150-2160, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1226002>.
- MEJIAS, L.; LAI, J.; BRUGGEMANN, T. Sensors for Missions. In: VALAVANIS, K.P.; VACHTSEVANOS, G.J. (Ed.). **Handbook of Unmanned Aerial Vehicles**. Dordrecht: Springer, 2015. p.385-399. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_6.
- MELESSE, A.M.; WENG, Q.; THENKABAIL, P.S.; SENAY, G.B. Remote sensing sensors and applications in environmental resources mapping and modelling. **Sensors**, v.7, p.3209-3241, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3390/s7123209>.
- MERINO, L.; CABALLERO, F.; MARTÍNEZ-DE-DIOS, J.R.; MAZA, I.; OLLERO, A. An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v.65, p.533-548, 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-3033-5_37.
- MICHEZ, A.; PIÉGAY, H.; JONATHAN, L.; CLAESSENS, H.; LEJEUNE, P. Mapping of riparian invasive species with supervised classification of Unmanned Aerial System (UAS) imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.44, p.88-94, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.014>.
- MONTES DE OCA, A.; ARREOLA, L.; FLORES, A.; SANCHEZ, J.; FLORES, G. Low-cost multispectral imaging system for crop monitoring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS, 2018, Dallas. **Proceedings**. Dallas: [s.n.], 2018. p.443-451. ICUAS'18. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453426>.
- MORAN, M.S.; BRYANT, R.; THOME, K.; NI, W.; NOUVELLON, Y.; GONZALEZ-DUGO, M.P.; QI, J.; CLARK, T.R. A refined empirical line approach for reflectance factor retrieval for Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+. **Remote Sensing of Environment**, v.78, p.71-82, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00250-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00250-4).
- MOZGERIS, G.; JONIKAVICIUS, D.; JOVARAUSKAS, D.; ZINKEVICIUS, R.; PETKEVICIUS, S.; STEPONAVICIUS, D. Imaging from manned ultra-light and unmanned aerial vehicles for estimating properties of spring wheat. **Precision Agriculture**, v.19, p.876-894, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9562-9>.
- MULERO-PÁZMÁNY, M.; STOLPER, R.; VAN ESSEN, L.D.; NEGRO, J.J.; SASSEN, T. Remotely piloted aircraft systems as a rhinoceros anti-poaching tool in Africa. **PLoS One**, v.9, e83873, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083873>.
- MULLA, D.J. Twenty-Five Years of Remote Sensing in Precision Agriculture: Key Advances and Remaining Knowledge Gaps. **Biosystems Engineering**, v.114, p.358-371, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>.
- NANSEN, C.; ZHAO, G.; DAKIN, N.; ZHAO, C.; TURNER, S.R. Using hyperspectral imaging to determine germination of native Australian plant seeds. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.145, p.19-24, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.02.015>.
- NATIONALMUSEUM OF THE UNITED STATES AIR FORCE. **Radioplane/northrop MQM-57 falconer factsheet**. 2009. Disponível em: <<https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/195784/radioplanenorthrop-mqm-57-falconer/>>. Acesso em: 7 jan. 2019.

- NEBIKER, S.; LACK, N.; ABÄCHERLI, M.; LÄDERACH, S. Light-weight multispectral UAV sensors and their capabilities for predicting grain yield and detecting plant diseases. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.41-B1, p.963-970, 2016. XXIII ISPRS Congress. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-963-2016>.
- NEWCOME, L.R. **Unmanned aviation**: a brief history of unmanned aerial vehicles. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. 172p. DOI: <https://doi.org/10.2514/4.868894>.
- NGUY-ROBERTSON, A.L.; BRINLEY BUCKLEY, E.M.; SUYKER, A.S.; AWADA, T.N. Determining factors that impact the calibration of consumer-grade digital cameras used for vegetation analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v.37, p.3365-3383, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1199061>.
- NORIEGA, A.; ANDERSON, R.P. Linear-optimization-based path planning algorithm for an agricultural UAV. In: AIAA INFOTECH@AEROSPACE CONFERENCE, 2016, San Diego. **Proceedings**. [San Diego]: AIAA, 2016. v.1, p.1003. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2016-1003>.
- O'CONNOR, J.; SMITH, M.J.; JAMES, M.R. Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: optimising image data. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v.41, p.325-344, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133317703092>.
- PEÑA, J.M.; TORRES-SÁNCHEZ, J.; CASTRO, A.I. de; KELLY, M.; LÓPEZ-GRANADOS, F. Weed mapping in early-season maize fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. **PLoS ONE**, v.8, e77151, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077151>.
- PINTER JR., P.J.; HATFIELD, J.L.; SCHEPERS, J.S.; BARNES, E.M.; MORAN, M.S.; DAUGHTRY, C.S.T.; UPCHURCH, D.R. Remote Sensing for Crop Management. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.69, p.647-664, 2003. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.647>.
- POLERECKY, L.; BISSETT, A.; AL-NAJJAR, M.; FAERBER, P.; OSMERS, H.; SUCI, P.A.; STOODLEY, P.; DE BEER, D. Modular spectral imaging system for discrimination of pigments in cells and microbial communities. **Applied and Environmental Microbiology**, v.75, p.758-771, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00819-08>.
- PROCTOR, C.; HE, Y. Workflow for building a hyperspectral UAV: challenges and opportunities. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.40-1/W4, p.415-419, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-415-2015>.
- QUATTROCHI, D.A.; LUVALL, J.C. Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and applications. **Landscape Ecology**, v.14, p.577-598, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008168910634>.
- QUILTER, M.C.; ANDERSON, V.J. Low altitude/large scale aerial photographs: a tool for range and resource managers. **Rangelands**, v.22, p.13-17, 2000. DOI: https://doi.org/10.2458/azu_rangelands_v22i2_quilter.
- RADOGLOU-GRAMMATIKIS, P.; SARIGIANNIDIS, P.; LAGKAS, T.; MOSCHOLIOS, I. A compilation of UAV applications for precision agriculture. **Computer Networks**, v.172, art.107148, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107148>.
- REICH, P.B.; TILMAN, D.; ISBELL, F.; MUELLER, K.; HOBBIE, S.E.; FLYNN, D.F.B.; EISENHAUER, N. Impacts of biodiversity loss escalate through time as redundancy fades. **Science**, v.336, p.589-592, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1217909>.
- RIBERA, J.; HE, F.; CHEN, Y.; HABIB, A.F.; DELP, E.J. Estimating Phenotypic Traits from UAV Based RGB Imagery. In: ACM SIGKDD CONFERENCE ON KNOWLEDGE DISCOVERY AND DATA MINING, 22., 2016, San Francisco. **[Proceedings]**. San Francisco, [s.n.], 2016. p.1-8.
- RODRÍGUEZ, A.; NEGRO, J.J.; MULERO, M.; RODRÍGUEZ, C.; HERNÁNDEZ-PLIEGO, J.; BUSTAMANTE, J. The eye in the sky: combined use of unmanned aerial systems and GPS data loggers for ecological research and conservation of small birds. **PLoS One**, v.7, e50336, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050336>.
- ROMERO, M.; LUO, Y.; SU, B.; FUENTES, S. Vineyard water status estimation using multispectral imagery from an UAV platform and machine learning algorithms for irrigation scheduling management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.147, p.109-117, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.013>.
- SÁ, N.C. de; CASTRO, P.; CARVALHO, S.; MARCHANTE, E.; LÓPEZ-NÚÑEZ, F.A.; MARCHANTE, H. Mapping the flowering of an invasive plant using unmanned aerial vehicles: is there potential for biocontrol monitoring? **Frontiers in Plant Science**, v.9, p.293, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00293>.
- SANDBROOK, C. The social implications of using drones for biodiversity conservation. **Ambio**, v.44, p.S636-S647, 2015. Suppl. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0714-0>.
- SANTESTEBAN, L.G.; DI GENNARO, S.F.; HERRERO-LANGREO, A.; MIRANDA, C.; ROYO, J.B.; MATESE, A. High-resolution UAV-based thermal imaging to estimate the instantaneous and seasonal variability of plant water status within a vineyard. **Agricultural Water Management**, v.183, p.49-59, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.026>.
- SCHIFFMAN, R. Drones Flying high as new tool for field biologists. **Science**, v.344, p.459, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.344.6183.459>.

- SHAFIAN, S.; RAJAN, N.; SCHNELL, R.; BAGAVATHIANNAN, M.; VALASEK, J.; SHI, Y.; OLSENHOLLER, J. Unmanned aerial systems-based remote sensing for monitoring sorghum growth and development. **PLoS ONE**, v.13, e0196605, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196605>.
- SHAKHATREH, H.; SAWALMEH, A.H.; AL-FUQAHA, A.; DOU, Z.; ALMAITA, E.; KHALIL, I.; OTHMAN, N.S.; KHREISHAH, A.; GUIZANI, M. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a survey on civil applications and key research challenges. **IEEE Access**, v.7, p.48572-48634, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>.
- SHENG, H.; CHAO, H.; COOPMANS, C.; HAN, J.; MCKEE, M.; CHEN, Y. Low-cost UAV-based thermal infrared remote sensing: platform, calibration and applications. In: **IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONIC AND EMBEDDED SYSTEMS AND APPLICATIONS**, 2010, QingDao. **Proceedings**. [S.l.]: IEEE, 2010. p.38-43. DOI: <https://doi.org/10.1109/MESA.2010.5552031>.
- SHI, Y.; MURRAY, S.C.; ROONEY, W.L.; VALASEK, J.; OLSENHOLLER, J.; PUGH, N.A.; HENDRICKSON, J.; BOWDEN, E.; ZHANG, D.; THOMASSON, J.A. Corn and sorghum phenotyping using a fixed-wing UAV-based remote sensing system. **Proceedings SPIE, Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping**, v.9866, p.98660E, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2228737>.
- SMIGAJ, M.; GAULTON, R.; BARR, S.L.; SUÁREZ, J.C. UAV-BORNE thermal imaging for forest health monitoring: detection of disease-induced canopy temperature increase. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v.40-3/W3, p.349-354, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-349-2015>.
- SMITH, M.O.; USTIN, S.L.; ADAMS, J.B.; GILLESPIE, A.R. Vegetation in deserts: I. A regional measure of abundance from multispectral images. **Remote Sensing of Environment**, v.31, p.1-26, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90074-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90074-V).
- SOER, G.J.R. Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures. **Remote Sensing of Environment**, v.9, p.27-45, 1980. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(80)90045-0).
- SPANGLER, L.H.; DOBECK, L.M.; REPASKY, K.S.; NEHRIR, A.R.; HUMPHRIES, S.D.; BARR, J.L.; KEITH, C.J.; SHAW, J.A.; ROUSE, J.H.; CUNNINGHAM, A.B.; BENSON, S.M.; OLDENBURG, C.M.; LEWICKI, J.L.; WELLS, A.W.; DIEHL, J.R.; STRAZISAR, B.R.; FESSENDEN, J.E.; RAHN, T.A.; AMONETTE, J.E.; BARR, J.L.; WILLIAM L.; PICKLES, W.L.; JACOBSON, J.A.; SILVER, E.A.; MALE, E.J.; RAUCH, H.W.; GULLICKSON, K.S.; TRAUTZ, R. KHARAKA, Y.; BIRKHOLZER, J.; WIELOPOLSKI, J. A shallow subsurface controlled release facility in Bozeman, Montana, USA, for testing near surface CO₂ detection techniques and transport models. **Environmental Earth Science**, v.60, p.227-239, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0400-2>.
- STROPPIANA, D.; VILLA, P.; SONA, G.; RONCHETTI, G.; CANDIANI, G.; PEPE, M.; Busetto, L.; MIGLIAZZI, M.; BOSCHETTI, M. Early season weed mapping in rice crops using multi-spectral UAV data. **International Journal of Remote Sensing**, v.39, p.5432-5452, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1441569>.
- TOKEKAR, P.; HOOK, J.V.; MULLA, D.; ISLER, V. Sensor planning for a symbiotic UAV and UGV system for precision agriculture. **IEEE Transactions on Robotics**, v.32, p.1498-1511, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2603528>.
- TOMLINS, G.F.; LEE, Y.J. Remotely Piloted aircraft: an inexpensive option for large scale aerial photography in forestry applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.9, p.76-85, 1983. DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.1983.10855042>.
- TORRES-SÁNCHEZ, J.; LÓPEZ-GRANADOS, F.; CASTRO, A.I. de; PEÑA-BARRAGÁN, J.M. Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management. **PLoS ONE**, v.8, e58210, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058210>.
- TORRES-SÁNCHEZ, J.; LÓPEZ-GRANADOS, F.; SERRANO, N.; ARQUERO, O.; PEÑA, J.M. High-throughput 3-d monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology. **PLoS ONE**, v.10, e0130479, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130479>.
- UTO, K.; SEKI, H.; SAITO, G.; KOSUGI, Y. Characterization of rice paddies by a UAV-mounted miniature hyperspectral sensor system. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.6, p.851-860, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2250921>.
- VALASEK, J.; HENRICKSON III, J.V.; BOWDEN, E.; SHI, Y.; MORGAN, C.L.S.; NEELY, H.L. Multispectral and DSLR sensors for assessing crop stress in corn and cotton using fixed-wing unmanned air systems. **Proceedings SPIE, Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping**, v.9866, p.98660L, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2228894>.
- VALAVANIS, K.P.; VACHTSEVANOS, G.J. Introduction to the Handbook on UAVs. In: VALAVANIS, K.P.; VACHTSEVANOS, G.J. (Ed.). **Handbook of Unmanned Aerial Vehicles**. Dordrecht: Springer, 2015. p.5-42. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_91.
- VAN MOORSEL, S.J.; HAHN, T.; WAGG, C.; DE DEYN, G.B.; FLYNN, D.F.B.; ZUPPINGER-DINGLEY, D.; SCHMID, B. Community evolution increases plant productivity at low diversity. **Ecology Letters**, v.21, p.128-137, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12879>.
- VERGER, A.; VIGNEAU, N.; CHÉRON, C.; GILLIOT, J.-M.; COMAR, A.; BARET, F. Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. **Remote Sensing of Environment**, v.152, p. 654-664, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.006>.

- VILJANEN, N.; HONKAVAARA, E.; NASI, R.; HAKALA, T.; NIEMELÄINEN, O.; KAIVOSOJA, J. A novel machine learning method for estimating biomass of grass swards using a photogrammetric canopy height model, images and vegetation indices captured by a drone. **Agriculture**, v.8, art.70, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture8050070>.
- WAN, H.; WANG, Q.; JIANG, D.; FU, J.; YANG, Y.; LIU, X. Monitoring the invasion of *Spartina Alterniflora* using very high resolution unmanned aerial vehicle imagery in Beihai, Guangxi (China). **The Scientific World Journal**, v.2014, art.638296, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/638296>.
- WAN, L.; LI, Y.; CEN, H.; ZHU, J.; YIN, W.; WU, W.; ZHU, H.; SUN, D.; ZHOU, W.; HE, Y. Combining UAV-based vegetation indices and image classification to estimate flower number in oilseed rape. **Remote Sensing**, v.10, art.1484, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10091484>.
- WATSON, J.E.M.; DUDLEY, N.; SEGAN, D.B.; HOCKINGS, M. The performance and potential of protected areas. **Nature**, v.515, p.67-73, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature13947>.
- WESTER-EBBINGHAUS, W. Aerial photography by radio controlled model helicopter. **The Photogrammetric Record**, v.10, p.85-92, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1980.tb00006.x>.
- WHITEHEAD, K.; HUGENHOLTZ, C.H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v.2, p.69-85, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1139/juvs-2014-0006>.
- XIANG, H.; TIAN, L. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). **Biosystems Engineering**, v.108, p.174-190, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.010>.
- YOUNGBLOOD, J.W.; JACKSON, R.D. Airborne reconnaissance in the civilian sector: agricultural monitoring from high-altitude powered platforms. **Proceedings SPIE, Airborne Reconnaissance VII**, v.424, p.182-189, 1983. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.936205>. ZALOGA, S.J. **Unmanned Aerial Vehicles: Robotic Air Warfare 1917-2007**. New York: Osprey, 2008. 48p.
- ZAMAN, B.; JENSEN, A. M.; MCKEE, M. Use of High-Resolution Multi-Spectral Imagery Acquired with an Autonomous Unmanned Aerial Vehicle to Quantify the Spread of an Invasive Wetlands Species. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2011, Vancouver. **Proceedings**. Vancouver: IEEE, 2011. p.803-806. IGARSS 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6049252>.
- ZARCO-TEJADA, P.J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; BERNI, J.A.J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. **Remote Sensing of Environment**, v.117, p.322-337, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007>.
- ZARCO-TEJADA, P.J.; GUILLÉN-CLIMENT, M.L.; HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R.; CATALINA, A.; GONZÁLEZ, M.R.; MARTÍN, P. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). **Agricultural and Forest Meteorology**, v.171-172, p.281-294, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.12.013>.
- ZHANG, C.; KOVACS, J.M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. **Precision Agriculture**, v.13, p.693-712, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>.
- ZHANG, C.; WALTERS, D.; KOVACS, J.M. Applications of low altitude remote sensing in agriculture upon farmers' requests— a case study in Northeastern Ontario, Canada. **PLoS ONE**, v.9, e112894, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112894>.
- ZHANG, Q.; MIDDLETON, E.M.; CHENG, Y.-B.; HUENNRICH, K.F.; COOK, B.D.; CORP, L.A.; KUSTAS, W.P.; RUSS, A.L.; PRUEGER, J.H.; YAO, T. Integrating chlorophyll fAPAR and nadir photochemical reflectance index from EO-1/Hyperion to predict cornfield daily gross primary production. **Remote Sensing of Environment**, v.186, p.311-321, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.026>.
- ZHANG, Q.; QIN, R.; HUANG, X.; FANG, Y.; LIU, L. Classification of ultra-high resolution orthophotos combined with DSM using a dual morphological top hat profile. **Remote Sensing**, v.7, p. 16422-16440, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs71215840>.
- ZHENG, H.; CHENG, T.; LI, D.; ZHOU, X.; YAO, X.; TIAN, Y.; CAO, W.; ZHU, Y. Evaluation of RGB, color-infrared and multispectral images acquired from Unmanned Aerial Systems for the estimation of nitrogen accumulation in rice. **Remote Sensing**, v.10, art.824, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10060824>.
- ZHOU, X.; ZHENG, H.B.; XU, X.Q.; HE, J.Y.; GE, X.K.; YAO, X.; CHENG, T.; ZHU, Y.; CAO, W.X.; TIAN, Y.C. Predicting grain yield in rice using multi-temporal vegetation indices from UAV-based multispectral and digital imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.130, p.246-255, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.05.003>.
- ZILIANI, M.G.; PARKES, S.D.; HOTEIT, I.; MCCABE, M.F. Intra-season crop height variability at commercial farm scales using a fixed-wing UAV. **Remote Sensing**, v.10, art.2007, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10122007>.