

ORBIO: Uma aplicação web para controle biológico com veículos aéreos não tripulados

ORBIO: A Web Application for Biological Control with Unmanned Aerial Vehicles

Bruno Siqueira da Silva¹, Tauã Milech Cabreira², Bruno José Olivieri de Souza³, Nicholas Matias⁴, Ricardo Antônio de Oliveira Machado⁵, Lucio André de Castro Jorge⁶, Paulo Roberto Ferreira Junior⁷

¹ Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha (IFFar), São Borja (RS), Brasil, bruno.siqueira@iffarroupilha.edu.br

² Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense (IFSul), Pelotas (RS), Brasil, taucabreira@ifsul.edu.br

³ Professor, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), Rio de Janeiro (RJ), Brasil, bolivieri@inf.puc-rio.br

⁴ Pesquisadores, BirdView Drone Bio Control, São Manoel (SP), Brasil, nicholas@birdview.com.br

⁵ Pesquisadores, BirdView Drone Bio Control, São Manoel (SP), Brasil, ricardo@birdview.com.br

⁶ Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, lucio.jorge@embrapa.br

⁷ Professor, Programa de Pós-Graduação em Computação (PPGC), Universidade Federal de Pelotas (UFPeL), Pelotas (RS), Brasil, paulo.ferreira@inf.ufpel.edu.br

RESUMO

Pragas e doenças agrícolas podem causar prejuízos financeiros na escala de milhões por ano e ameaçar a segurança alimentar. O controle biológico (CB) é um processo para mitigar uma determinada população de pragas, tornando-as menos abundantes e prejudiciais, utilizando inimigos naturais. O uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) como plataforma de apoio ao CB é promissor devido ao baixo custo operacional, alta eficiência e ampla faixa de aplicação. O planejamento da rota de cobertura do VANT é necessário para uma dispersão eficaz em uma área agrícola. No entanto, em muitos casos, esse planejamento é realizado empiricamente por pilotos em campo. Diversas necessidades devem ser consideradas na busca pela automatização e pela otimização do planejamento de rotas de cobertura para CB utilizando VANTs, tais como: identificação das principais características da área de cobertura, busca pelos pontos de pouso e decolagem adequados, determinação da distância entre as linhas paralelas da trajetória considerando o tipo de aplicação do agente biológico em uso, definição da altitude de voo, retorno com segurança à base considerando as limitações de energia do veículo e geração de arquivos contendo pontos de rota prontos para voar. Este capítulo apresenta uma aplicação web contendo um algoritmo de planejamento de caminhos de cobertura para automatizar rotas de controle biológico considerando aspectos essenciais de um cenário do mundo real. Voos reais planejados a partir do uso do aplicativo mostram a eficiência e confiabilidade da abordagem proposta.

Palavras-chave: agricultura de precisão; controle biológico; planejamento de rotas de cobertura; veículos aéreos não tripulados; manejo integrado de pragas.

ABSTRACT

Agricultural pests and diseases can threaten food security and cause multi-million dollar losses annually. Biological control (BC) is a process employing natural enemies to mitigate particular pest populations, thereby reducing their abundance and harmful effects. The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) as a platform to support BC shows promise due to low operating costs, high efficiency, and wide application range. UAV coverage path planning is necessary for effective dispersion over an agricultural area. However, planning is frequently carried out in situ by pilots in the field. Several issues need to be considered when seeking to automate and optimize coverage route planning for BC using UAVs. These include: identifying the main characteristics of the coverage area, looking for suitable landing and take-off points, determining the distance between the parallel line of the coverage trajectory given the biological agent in use, setting the flight altitude, safely returning to the base considering

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000081>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

vehicle energy limitations, and generating ready-to-fly route coverage files. This chapter presents the implementation of a web application applying a coverage path planning algorithm for automating biological control routes considering essential aspects of a real-world scenario. Actual flights using the application demonstrate the efficiency and reliability of the proposed approach.

Keywords: precision agriculture; biological control; coverage path planning; unmanned aerial vehicles; integrated pest management.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização de Agricultura e de Alimentos das Nações Unidas (ONU) (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019), estima-se que sejam perdidos, a cada ano, entre 20% e 40% da produção agrícola mundial devido a pragas e doenças que afetam as lavouras, valor que corresponde a aproximadamente 220 bilhões de dólares. Somente este ano, no Brasil, o prejuízo entre os produtores de grãos pode chegar a mais de R\$ 41 bilhões. Além das dificuldades climáticas, que puxaram essa quebra de safra, o produtor também enfrenta problemas com as pragas. No Mato Grosso do Sul, o Sistema de Informação do Agronegócio – Siga MS, aponta um prejuízo estimado em aproximadamente R\$ 5,8 bilhões. Recentemente, a Cogo Inteligência em Agronegócio apresentou um levantamento apontando que os prejuízos de quebra tanto da soja como do milho podem chegar a R\$ 41,6 bilhões (Play no Agro, 2024).

O controle biológico (CB) através de métodos que utilizam inimigos naturais¹ surge como uma importante alternativa para o controle de pragas nas lavouras, visando não apenas a redução das perdas financeiras provocadas pelos agentes nocivos, mas também a substituição de agrotóxicos e de produtos químicos prejudiciais a nossa saúde. Segundo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2021), o CB é um método de controle racional e saudável, que não deixa resíduos nos alimentos e é inofensivo ao meio ambiente e à saúde da população.

Uma cultura pode ser infectada em sua totalidade, dependendo do tipo de praga. Dessa forma, reduções no inóculo requerem dedicação contínua e recursos de mão de obra. O custo do manejo pode incluir inspeções realizadas por especialistas e aplicação de inseticidas para controle, o que pode acarretar um aumento dos custos de produção (Fontes; Valadares-Inglis, 2020). O grande desafio do CB é encontrar uma forma eficiente e economicamente sustentável de dispersão dos agentes biológicos nas áreas agrícolas. Uma alternativa interessante seria a proposição de um planejamento de missões inteligente, utilizando veícu-

los aéreos não tripulados (VANT) para transportar e disseminar esses agentes. Para Freitas et al. (2020), o uso desse tipo de plataforma aérea é promissor para o controle biológico, pois pode-se reduzir custos e superar barreiras naturais, como rios ou contato com animais silvestres perigosos, com alta eficiência e uma faixa de aplicação ampla.

Nesse tipo de missão, o VANT deve sobrevoar uma determinada área transportando os agentes biológicos enquanto realiza a dispersão desses agentes em todos os pontos. Na literatura, esse tipo de problema é classificado como um subtópico da Robótica, conhecido como planejamento de rotas de cobertura (PRC). O planejamento da trajetória também engloba a definição das posições de decolagem e de pouso mais adequadas, levando em consideração a necessidade de um operador humano na execução de missões não autônomas e na supervisão de missões autônomas. Além disso, é preciso ter flexibilidade e agilidade no planejamento da trajetória, permitindo ao operador a modificação da rota previamente elaborada, considerando condições adversas inicialmente não observadas, tais como bloqueios de certas localidades, erosão ou inundação de estradas não frequentadas de grandes fazendas.

Outro fator crucial no planejamento de rotas é a quantidade de energia disponível nas baterias dos veículos aéreos. Os veículos devem retornar à base antes que sua fonte de energia se esgote completamente, para evitar colisões e acidentes. Usualmente, adota-se uma relação 70/30 de uso da bateria durante uma missão, em que o voo é executado utilizando apenas 70% da energia disponível na bateria, reservando-se os outros 30% restantes para um retorno seguro à base. Isso implica num planejamento que considere rotas mais curtas e simples, que possam ser executadas em apenas um voo com duração de tempo limitada – geralmente em torno de 15 minutos – dependendo do modelo de VANT adotado. Em áreas mais extensas, faz-se necessário a decomposição da área em subáreas e/ou da rota completa em sub-rotas, para a execução da missão através de múltiplos voos. Já os múltiplos voos podem ser executados por um único VANT, retornando à base para a troca de bateria entre um voo e outro, ou por múltiplos veículos

¹ Os inimigos naturais também podem ser chamados de parasitoides, predadores ou patógenos.

simultaneamente, exigindo o processamento de tarefas adicionais de coordenação da frota. Todas essas questões são restrições significativas a serem consideradas no problema de planejamento de rotas de cobertura em um cenário real.

Este capítulo apresenta a aplicação web ORBIO² para o planejamento de missões de cobertura aérea para controle biológico utilizando VANT. A aplicação é responsável pela organização e pelo gerenciamento de diversas missões. A verificação da proposta da aplicação é realizada através da implementação de um sistema que é capaz de gerar trajetórias automatizadas e seguras de cobertura completa, considerando todos os importantes fatores expostos sobre um cenário de aplicação real. A aplicação inclui: (i) uma interface intuitiva e amigável para a definição da área de cobertura utilizando um mapa; (ii) um sistema de configuração cujos parâmetros – velocidade, altitude, distância entre linhas, tempo máximo de voo – podem ser definidos de acordo com o tipo de missão e/ou tipo de VANT utilizado; (iii) um algoritmo de planejamento de rotas de cobertura baseado em movimentos de vai e volta e com trecho de retorno à base inteligente, com posições de decolagem e de pouso definidas pelo usuário; e (iv) uma ferramenta para a gerar arquivos de rota completos para o voo³.

Este capítulo está dividido nas seguintes seções: seção 2 apresenta uma contextualização sobre o cenário do agronegócio no Brasil; seção 3 discorre sobre os trabalhos presentes na literatura que exploram soluções inteligentes para o controle biológico com o uso de VANT; seção 4 apresenta a aplicação web ORBIO para gerenciamento e planejamento de rotas de cobertura para controle biológico; seção 5 apresenta a implementação da aplicação web baseada em Java Script, que visa a otimização do transporte e da dispersão de agentes biológicos em culturas; seção 6 explica em detalhes a concepção do algoritmo de vai e volta para o problema de cobertura; seção 7 discorre sobre os experimentos realizados com voos reais para a validação da abordagem proposta; e, por fim, seção 8 aborda as conclusões e os trabalhos futuros.

² ORBIO é a sigla para Otimizador de Rotas para Controle Biológico.

³ Esses arquivos possuem um formato reconhecido pela maioria das controladoras de voo do mercado, contendo informações de altitude, velocidade, latitude, longitude, bem como comandos específicos de voo, tais como decolagem, mudança de velocidade, deslocamento até o(s) ponto(s) da rota, retorno à base e pouso.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE O CENÁRIO DO AGRONEGÓCIO

O Brasil é líder mundial no setor do agronegócio, mas esse título foi alcançado graças ao uso intensivo de agrotóxicos sintéticos que também levou o país a se tornar o líder mundial no consumo desses produtos. De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), o Brasil é responsável por um quinto do consumo mundial de agrotóxicos, usando 19% dos agrotóxicos produzidos no mundo. Anualmente são usados no mundo aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de agrotóxicos. No Brasil, o consumo anual tem sido superior a 300 mil toneladas. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a utilização de produtos químicos para o controle de pragas, doenças e ervas daninhas mais que dobrou em dez anos. Entre 2002 e 2012, a comercialização de agrotóxicos no país passou de quase três quilos por hectare para sete quilos por hectare. Além do aumento do uso de agrotóxicos sobre os alimentos, o IBGE também avaliou os diferentes tipos de agrotóxicos sintéticos pulverizados sobre as lavouras. Cerca de 30% dos agrotóxicos foram classificados como muito perigosos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2021).

Apesar desses dados alarmantes, o Brasil também começou a se destacar positivamente na liderança mundial de tecnologias relacionadas ao controle biológico, com aplicação em mais de 23 milhões de hectares. Enquanto o mercado de biológicos do mundo está crescendo 9% ao ano, em nosso país o aumento é de mais de 15% (Campo e Negócio, 2019). Somente no ano de 2020, mais de US\$ 5 bilhões foram movimentados nesse setor, sendo US\$ 800 milhões apenas na América Latina. Mas, apesar do grande crescimento na comercialização de insumos biológicos, os biodefensivos representam apenas 2% do mercado. Ou seja, 98% das vendas ainda são de defensivos químicos (Portal do Agronegócio, 2019). O aumento do uso do controle biológico se deve ao fato de as pessoas estarem buscando alimentos mais saudáveis, que sejam produzidos de forma sustentável e sem contaminar o ambiente. Outro fator que também justifica esse crescimento é a resistência que as pragas desenvolvem aos produtos químicos disponíveis, que deixam de ser efetivos.

Embora se trate de uma alternativa sustentável e com um mercado promissor, o controle biológico ainda esbarra na necessidade de meios mais inteligentes e eficazes de transporte e de dispersão desses agentes em áreas agrícolas. O processo é muitas vezes realizado de forma manual, por trabalhadores que percorrem longas distâncias para espalhar os agentes bio-

lógicos. Algumas iniciativas de automatização desse processo têm sido exploradas com o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), cuja estrutura pode ser adaptada com um dispositivo acoplado responsável por armazenar e dispersar os agentes biológicos em intervalos regulares de tempo (Zhan et al., 2021). Usualmente, esses veículos são guiados por operadores humanos através de controle remoto ou possuem armazenado em sua memória um plano de voo previamente elaborado de forma manual, através de um software, na estação de controle terrestre – o software de planejamento de voo mais popular é o Mission Planner (Osborne, 2010), cuja interface é compatível apenas com o sistema operacional Windows. Algumas iniciativas que utilizam VANT para o controle biológico explorando o problema de planejamento de rotas de cobertura são detalhadas na seção a seguir, seguida pela solução completa proposta neste capítulo.

3 AVANÇOS TECNOLÓGICOS NO CONTROLE BIOLÓGICO

Soluções de planejamento de cobertura para veículos aéreos não tripulados (VANTs) com preocupação energética foram propostas recentemente por Di Franco e Buttazzo (2016) e Cabreira et al. (2018). No trabalho de Di Franco e Buttazzo (2016) é proposto um algoritmo de cobertura baseado no movimento de vai e volta para aplicações de fotogrametria, que consiste em tirar uma sequência de fotos aéreas para montagem de um mosaico que pode ser utilizado na área de agricultura de precisão para identificação de pragas e doenças. Também voltado para a aplicação de fotogrametria, o trabalho de Cabreira et al. (2018) explora o movimento em espiral para realizar coberturas com VANT, apresentando melhores resultados em termos de consumo de energia em relação a seu antecessor. Ambas as soluções lidam com áreas de cobertura regulares (retângulos e polígonos simples) e não consideram o transporte e dispersão de agentes biológicos.

O trabalho de Valente et al. (2013) propõe uma solução para o planejamento de rotas de cobertura para a formação de mosaicos em agricultura de precisão, lidando com áreas mais complexas e irregulares, que podem incluir zonas de voo proibidas. Já a pesquisa de Barrientos et al. (2011) explora o planejamento de cobertura utilizando múltiplos VANTs com características variadas em áreas irregulares mais amplas. A área é dividida em subáreas designadas para cada veículo. Os veículos, por sua vez, exploram individualmente as suas respectivas subáreas sem qualquer tipo de comunicação ou coordenação entre eles. O trabalho exige a adoção de uma fronteira de segurança en-

tre as subáreas, as quais os veículos são proibidos de sobrevoar para evitar a colisão entre eles. Apesar de lidarem com áreas mais complexas e adotarem múltiplos veículos, essas duas abordagens também não exploram o transporte e dispersão de agentes biológicos.

Na busca por patentes através do portal do Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI) foram encontradas algumas proposições, mas em sua maioria ainda sem concessão. Peter e Beitzel-Heineke (2020) propõem o desenvolvimento de um veículo terrestre equipado com um dispositivo de dispersão que se movimenta em linhas sobre o solo da cultura, sendo que as unidades biológicas são disparadas individualmente de maneira cronometrada. Nicodemo (2019, 2020) propõe um sistema embarcado multiuso para controle do processo de liberação de diferentes agentes biológicos, para automação do controle biológico de pragas através de meios convencionais (ex.: caminhando a pé e equipado com mochilas), de veículos terrestres (ex.: motos, tratores, uniport etc.), aéreos tripulados (ex.: aeronaves agrícolas, experimentais, outras de pequeno porte etc.) e aéreos não tripulados (ex.: VANTs). Apesar do dispositivo ser controlado por uma interface de comunicação padrão de sistemas de navegação e também ter a opção de conexão com interface humano-computador, a proposta não apresenta inovação em relação ao planejamento de missão com VANT integrado ao uso de dispensadores.

Machado e Matias (2019) propõem um sistema e um método para liberação de produtos sólidos, a granel ou com invólucro, para controle biológico de pragas na agricultura usando dispensadores acoplados ou incorporados a VANTs. No entanto, o VANT é remotamente pilotado por um operador humano. Matte e Santos (2019) também propõem um equipamento eletromecânico acoplável em VANTs para liberação de pulpas do agente biológico *Cotésia flavipes*, inimigo natural da lagarta do colmo, praga de plantas da família das *Poaceae*, principalmente da cana-de-açúcar. Novamente, a proposta foca na criação do dispositivo de dispersão sem apresentar inovação em relação à utilização manual do VANT como meio de transporte.

A pesquisa desenvolvida por Rangel (2016a, 2016b) utiliza VANT de asa fixa e rotativa, além de uma estação de controle para definir o plano de ação para o controle biológico. No entanto, a proposta não apresenta inovação no problema de planejamento da cobertura, uma vez que o plano de voo e a escolha do local de deposição dos inimigos naturais são realizados manualmente, o que exige mão de obra especializada, aumentando assim o tempo e o custo da missão. No trabalho proposto por Freitas et al. (2020) apresenta-se uma otimização de rota através da combinação

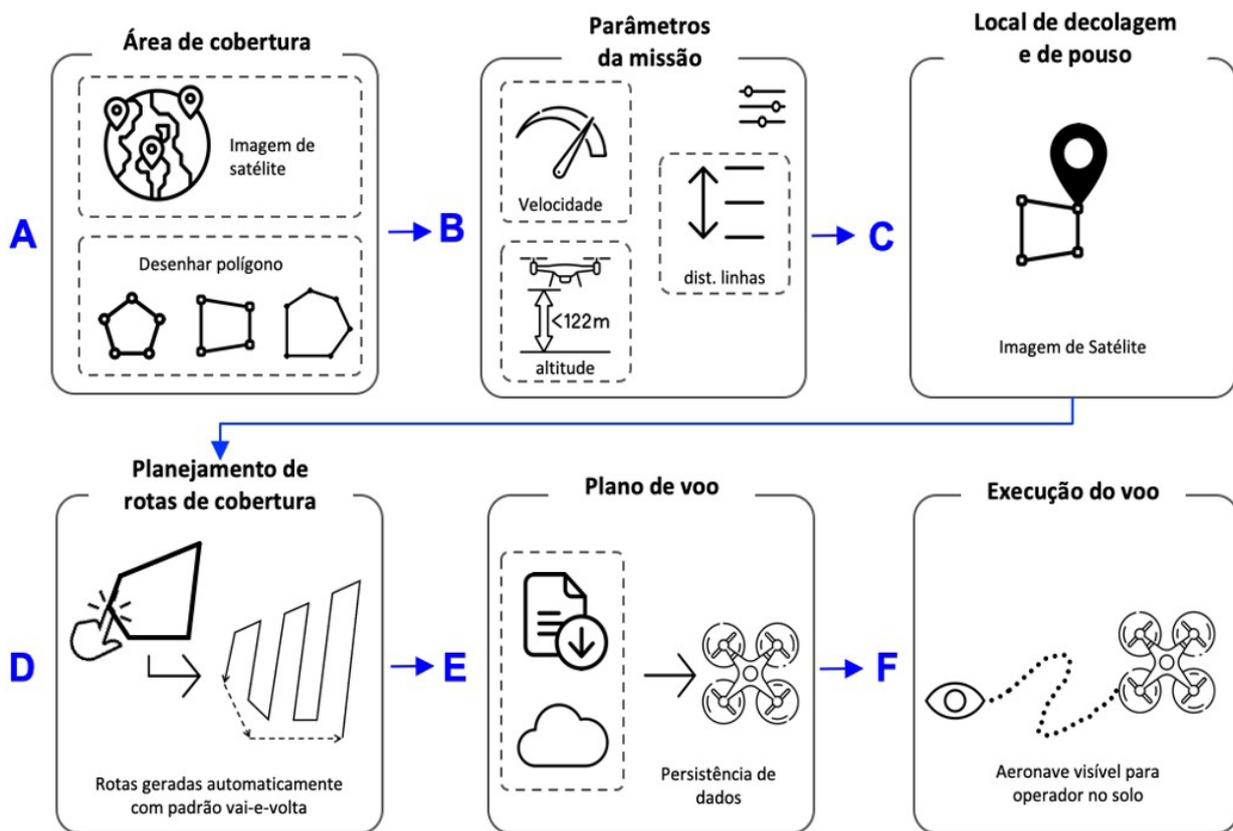


Figura 1. Diferentes etapas da aplicação web ORBIO.

de diferentes algoritmos para o lançamento de cápsulas contendo *Trichogramma*. Os locais de liberação das cápsulas foram calculados baseando-se no formato de hexágonos e a rota do VANT deve coincidir com o centro da forma geométrica. No entanto, o trabalho não considera a capacidade energética do veículo. Além disso, em áreas que exigem muitas manobras de virada, a abordagem proposta pode resultar em instabilidade na velocidade de voo e em aumento do consumo de energia. Esses aspectos são essenciais para o retorno seguro do veículo à base.

Zhan et al. (2021) propõem que um sistema de dispersão inteligente para cápsulas de *Trichogramma*. Os autores assumiram que a cobertura efetiva de uma cápsula é definida como uma área circular. A largura de operação e o intervalo de liberação do sistema de dispersão do VANT são formulados para o planejamento da rota, considerando o raio de cobertura da cápsula. O VANT realiza a cobertura de uma área previamente definida pelo operador humano em um sistema de posicionamento BeiDou⁴ e executa o voo em um padrão de vai e volta. O experimento não trata dos

⁴ BeiDou é um sistema chinês de posicionamento global por satélite, similar ao GPS norte-americano.

problemas de retorno seguro da área para a base e não explora áreas de cobertura complexas. A maioria das propostas está diretamente relacionada à tecnologia de criação de dispositivos inteligentes de dispersão, sem apresentar uma solução inteligente integrada aos VANTs para otimizar o planejamento de missões. Em nossa abordagem proposta, já temos o dispositivo de dispersão de agentes biológicos e vamos lidar com o problema de planejamento da missão. Além disso, as soluções encontradas não exploram o potencial de otimização da cobertura para a construção de um plano de missão eficaz e seguro que amplie a área de atuação do veículo aéreo.

4 APLICAÇÃO WEB ORBIO

A aplicação web ORBIO foi desenvolvida com o intuito de gerenciar as missões de dispersão de agentes biológicos em áreas agrícolas e prover a automatização do planejamento de rotas de cobertura com VANTs para esse tipo de missão. A Figura 1 ilustra a sequência das etapas que constituem a estrutura da aplicação.

A seguir, uma breve explicação sobre cada etapa da estrutura da aplicação:

- A. Área de cobertura: a área agrícola, na qual o controle biológico será realizado, é definida em um mapa com imagens de satélite através de uma ferramenta de desenho de polígonos;
- B. **Parâmetros da missão:** os parâmetros da missão são velocidade, altitude, distância entre linhas e o tempo máximo de voo. Esses parâmetros são configurados de acordo com o tipo de missão;
- C. **Local de decolagem e de pouso:** são os pontos de partida e de conclusão da rota. Podem ser definidos arbitrariamente por um operador humano, selecionando qualquer vértice do polígono definido na etapa (A);
- D. **Planejamento de rotas de cobertura:** é realizado a partir da seleção do local de partida e da configuração dos parâmetros da missão. O algoritmo gera uma trajetória baseada em movimentos de vai e volta a partir do/até o local definido em (C). Além disso, calcula o tempo total de voo estimado, considerando a velocidade adotada e a distância percorrida pelo VANT;
- E. **Plano de voo:** a rota de cobertura completa e pronta para o voo é salva em um arquivo no formato compatível com a maioria das controladoras de voo do mercado. O arquivo pode ser enviado para o VANT para a execução do voo pré-programado;
- F. **Execução do voo:** a aplicação dos agentes biológicos sobre a área agrícola segue o voo elaborado pelo algoritmo.

As etapas da aplicação ORBIO apresentadas na Figura 1 visam a automatizar a tarefa de planejamento de rotas de cobertura para controle biológico, antes realizada de forma completamente manual pelo operador humano do VANT. Através da estrutura provida pela aplicação, o operador humano apenas realiza o pré-planejamento da missão ao definir a área de cobertura, configurar os parâmetros e escolher o local de decolagem/pouso nas etapas (A), (B) e (C). A partir disso, o algoritmo de cobertura baseado em movimentos de vai e volta se encarrega da geração automática da trajetória (D) de forma rápida, dinâmica e intuitiva. As etapas (E) e (F) representam a saída da aplicação como resultado do processo de planejamento.

O sistema ORBIO representa um avanço no campo de planejamento de rotas agrícolas, destacando-se por sua combinação de facilidade de uso e eficiência energética. Em contraste com outros softwares do mercado, o ORBIO disponibiliza uma interface web amigável que simplifica a geração de rotas de cobertura complexas em áreas de cultivo extensas, demandando apenas alguns cliques e proporcionando agilidade e praticidade aos operadores. O sistema também pode ser utilizado de forma *offline*, em dispositivos mó-

veis, mesmo que esses dispositivos tenham uma configuração de hardware limitada. Através do ORBIO é possível desenhar polígonos no mapa e produzir rotas precisas que reduzem manobras desnecessárias e promovem economia de energia com padrões de voo em vai e volta projetados para diminuir as operações e o consumo energético durante as viradas. O sistema não só projeta uma rota completa, abrangendo decolagem, cobertura e pouso, mas também cria arquivos de *waypoint* prontos para uso, compatíveis com as principais controladoras de voo, facilitando a sua integração com VANTs de diferentes marcas e modelos. Essa interoperabilidade e celeridade destacam o ORBIO como uma solução distinta e eficaz no panorama de planejamento de rotas.

5. IMPLEMENTAÇÃO DA APLICAÇÃO

A aplicação web proposta foi implementada através de um sistema para verificação da eficácia da abordagem em um cenário real de controle biológico. O sistema pode ser utilizado de forma *offline* no campo, considerando que as fazendas brasileiras possuem duas grandes restrições principais: (1) a ausência de conexão com a internet durante a missão, cujo plano de voo pode necessitar de ajustes *in loco*, dependendo das condições do ambiente; (2) a necessidade do uso de computadores ou tablets de baixo custo que dificilmente teriam capacidade computacional necessária para processar tarefas de otimização.

O sistema é uma aplicação web baseada em JavaScript que explora a API Mapbox GL⁵ e a biblioteca Turf.js⁶. Através de uma interface intuitiva e amigável, é possível definir uma área de cobertura a partir do desenho de um polígono com alguns cliques em um mapa. Logo após a definição da área de cobertura, pode-se selecionar um dos vértices do polígono, também a partir de um clique, para a definição do ponto de decolagem e aterrissagem, assim como para a geração automatizada da rota de cobertura. A rota de cobertura consiste em movimentos de vai e volta alinhados com a maior aresta do polígono, o que garante melhor desempenho na execução do voo planejado em termos de tempo. A Figura 2 apresenta a interface do sistema.

⁵ API é a sigla para *Application Programming Interface* (interface de programação de aplicação). A API do Mapbox pode ser acessada em Mapbox (2024).

⁶ A biblioteca Turf.js pode ser acessada em Turf (2024).



Figura 2. Interface do sistema com rota de cobertura automatizada.

5.1 Delimitação da área de cobertura

O sistema apresenta uma interface de mapa de satélite com a mensagem “Desenhe um polígono” na parte central/superior da tela e um campo de formulário de pesquisa para selecionar um local específico para redirecionar o mapa no canto superior/direito. Botões de controle para aproximar/distanciar o mapa (ferramenta de zoom) estão disponíveis abaixo do campo de busca, assim como o botão de desenho do polígono e o botão da lixeira.

O usuário pode selecionar o botão de desenho do polígono e determinar a área a ser coberta clicando diretamente no mapa. Cada clique no mapa representa um vértice da área poligonal. Um duplo clique no último vértice finaliza o desenho do polígono. A linha laranja tracejada representa a área de cultivo a ser coberta pelo VANT. Uma vez finalizada a área poligonal, é possível selecionar e apagar vértices específicos usando o botão da lixeira. A Figura 2 apresenta a interface da aplicação.

5.2 Configuração de parâmetros da missão

O sistema contém quatro parâmetros de configuração da missão: altitude, velocidade, distância e tempo. O parâmetro “altitude” define a distância entre o VANT e o solo e seu valor varia entre 10 m e 50 m. O parâmetro “velocidade” configura a velocidade de voo do VANT para realizar a cobertura, variando de 1 m/s a 15 m/s. O parâmetro “distância” representa a distância entre as linhas paralelas do movimento de vai e volta e seu valor pode variar de 1 m a 100 m. Por

fim, o parâmetro “tempo” representa o tempo máximo permitido para cada voo individual. O valor varia entre 5 e 20 minutos.

Se a rota gerada inicialmente exceder o limite de tempo adiciona-se um ponto de quebra em meio a rota e divide-se a rota original em duas sub-rotas – se a rota original for muito extensa, ela pode ser dividida em mais partes. Cada sub-rota gera um arquivo específico de pontos de rota a ser carregado no VANT. Ao executar as sub-rotas, o VANT sempre passa pelo ponto de quebra da rota original e retorna à base para troca de bateria. Logo após a escolha de um novo plano de voo da sub-rota subsequente, o VANT retoma a cobertura a partir do ponto de quebra anterior. Sendo assim, a soma de todas as sub-rotas equivale à rota originalmente gerada pelo algoritmo, com a exceção do acréscimo de pontos de quebra que interrompem momentaneamente a missão para um retorno seguro à base para troca de bateria.

O usuário deve configurar previamente os parâmetros de acordo com o tipo de missão utilizando o botão azul no canto inferior/direito. No entanto, a aplicação é flexível e também é possível alterar os parâmetros após a geração da trajetória. Nesse caso, o caminho de cobertura é renderizado novamente de acordo com os novos valores. A aplicação também permite que o usuário selecione um tipo de plantio com valores pré-definidos para os parâmetros. Além disso, há uma opção chamada “WP Grid” para gerar Pontos de Rota intermediários (PRI) ao longo do caminho. A distância entre os PRI é igual à distância

entre as linhas. Os PRI podem ser usados para ativar um comando específico na controladora do VANT, tal como abrir ou fechar um dispensador para espalhar agentes biológicos.

5.3 Seleção do ponto de decolagem e de aterrissagem

A posição de decolagem e de pouso é configurada selecionando-se um dos vértices do polígono. A Figura 2 apresenta o vértice selecionado destacado pelo círculo laranja maior no canto superior direito da área. Essa etapa ainda é realizada manualmente pelo usuário, considerando o seu conhecimento prévio sobre o campo de cultivo e seu entorno, como estradas, lagos e locais inacessíveis. Nem sempre essas informações encontram-se disponíveis e/ou atualizadas nos mapas obtidos através de imagens de satélite. Nessas circunstâncias faz-se necessário um reconhecimento do campo para o planejamento da missão antes da geração da rota através da aplicação.

A trajetória de cobertura consiste em três fases ilustradas por cores diferentes. A cor azul representa a fase inicial, na qual o VANT se desloca da posição de decolagem até o início do movimento de vai e volta. A cor amarela representa a fase intermediária composta por movimentos de vai e volta alinhados à maior aresta do polígono. Essa estratégia reduz o tempo de cobertura, que está diretamente relacionado ao número mínimo de manobras de virada. Por fim, a fase final é representada pela cor verde e indica o subcaminho que liga o ponto final do movimento de vai e volta e o ponto de pouso. As partes da trajetória de cobertura próximas aos limites externos da área não são colocadas sobre as arestas do polígono, mas posicionadas considerando a metade da distância entre as linhas para melhorar o desempenho da cobertura.

5.4 Informações dinâmicas de área, distância e tempo

Os dados da missão de cobertura estão disponíveis na parte superior central do mapa. Os dados são atualizados dinamicamente à medida que a área de cultivo e o caminho de cobertura são gerados ou modificados pela interação do usuário com a aplicação. A Figura 2 apresenta dados relativos ao tamanho da área (55,41 ha), comprimento total do trajeto (11,66 km) e tempo de voo (24 m 17 s).

É possível aumentar ou diminuir o parâmetro de distância, o que acarreta um aumento ou redução do número de linhas paralelas do movimento de vai e volta. Essa modificação também altera o comprimento total do trajeto e o tempo de voo para realizar a cobertura. Nesses casos, a rota inicialmente plane-

jada é reconfigurada de acordo com os novos valores e redesenhada no mapa para visualização do usuário.

5.5 Opções de salvar e importar arquivos

O botão da missão (cor verde) localizado no canto inferior/esquerdo apresenta as várias opções. A opção “Novo” redefine os parâmetros e limpa o mapa. A opção “Salvar” armazena um ou mais arquivos no formato TXT com todos os pontos de rota e as coordenadas de área. Se o tempo de voo estimado da rota for menor que o parâmetro de configuração de tempo definido pelo usuário, apenas um arquivo de rota é salvo. No entanto, se o tempo de voo exceder o limite estipulado, faz-se necessário realizar mais de um voo a fim de cobrir toda a área sem riscos de energia. Nesses casos, um arquivo de rota é gerado para cada voo e cada voo cobre apenas uma parte da área de cultivo. O último ponto de rota de cada arquivo consiste no ponto de quebra que interrompe a cobertura e faz com que o VANT retorne à base para a troca de bateria. No momento da troca de bateria, altera-se o plano de voo para a realização do voo seguinte e assim por diante.

Também está disponível a opção “Salvar Rota Única”, que salva em um único arquivo todos os pontos de rota, mesmo em coberturas que demandam vários voos. Esta opção é interessante para armazenar a rota completa original, que pode ser posteriormente carregada através da opção de “Abrir” da aplicação. A opção “Abrir” seleciona e abre um arquivo previamente salvo, permitindo modificações na área e na trajetória original. Todos os arquivos de rota são compatíveis com a maioria das controladoras de voo do mercado e contêm comandos como decolagem (código 22), mudança de velocidade (código 178) e movimentação para um determinado ponto de rota (código 16). Os arquivos também armazenam informações relacionadas a latitude, longitude, altitude e velocidade.

A opção “Importar Ponto” abre um arquivo KML e redireciona o mapa para o local, enquanto a opção “Importar Poly” desenha um polígono de acordo com as coordenadas existentes. Esses formatos de arquivo geralmente são gerados através de softwares de geolocalização, como o Google Earth. É possível editar o polígono clicando duas vezes com o botão direito e arrastando os vértices, e também excluir os vértices selecionando o botão da lixeira. Por fim, tem-se a opção “Importar MP”, que permite ao usuário importar um arquivo criado no software de estação de controle Mission Planner, em que também podem ser desenhadas áreas de cobertura.

Por fim, a aplicação web ORBIO dispõe de uma “Central de Ajuda”, que pode ser acessada através do

ícone em formato de sinal de interrogação, no lado direito. A Central de Ajuda possui um vídeo tutorial⁷ com a demonstração completa de uso da aplicação. Além disso, a Central de Ajuda possui diversas seções/abas com a explicação de cada uma das opções presentes na aplicação. O manual completo contendo instruções detalhadas também pode ser encontrado no Github⁸.

6 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

Uma das principais vantagens da aplicação web proposta é que ela pode ser usada em dispositivos de baixo custo, até mesmo em smartphones. Por esse motivo é proposto um algoritmo com complexidade de ordem polinomial ao invés de técnicas de otimização, conforme apresentado na Figura 3. Essa abordagem significa que o tempo de processamento cresce proporcionalmente ao aumento do tamanho da entrada, mantendo-se gerenciável mesmo em dispositivos com hardware menos potente, evitando-se custos computacionais proibitivos associados a técnicas de otimização mais complexas⁹. Esta seção apresenta um algoritmo com complexidade de tempo $O(n^2)$, em que n é o número de vértices do polígono. Pela mesma razão, sua implementação é agnóstica, assim pode ser executada em diferentes plataformas. O Algoritmo 1 descreve o processo de vai e volta utilizado para a aplicação dos produtos de controle biológico.

A ideia geral da entrada do algoritmo consiste em um polígono representado por um conjunto de vértices $\{v_1, \dots, v_p\}$ e a posição inicial/final definida por $P_{início}$, indicando o local de decolagem e pouso para a missão. Cada vértice do polígono é representado por dois valores: latitude e longitude. O primeiro passo do algoritmo é calcular a aresta mais longa L_{aresta} do polígono e seu ângulo α considerando as coordenadas da área. A distância entre dois vértices consecutivos é medida e o processo é repetido até que todos os vértices sejam explorados. Alinhar o movimento de vai e vem de acordo com o ângulo da borda mais longa é importante porque melhora o desempenho da missão

⁷ Link para o tutorial de uso da aplicação ORBIO no YouTube (2024).

⁸ Link para o manual de uso da aplicação ORBIO em GitHub (2024).

⁹ Métodos de otimização frequentemente empregam abordagens como algoritmos de tempo exponencial ou superpolinomial (Grötschel et al., 1993), que podem ser computacionalmente inviáveis em dispositivos com capacidade de processamento limitada. A escolha de um algoritmo polinomial assegura que, mesmo com recursos de hardware restritos, o sistema consegue calcular rotas de forma eficiente, garantindo uma performance consistente e previsível sem sacrificar a qualidade do planejamento.

de cobertura, reduzindo o número de manobras de giro e, conseqüentemente, reduzindo o tempo de voo.

Então, na linha 3, o algoritmo desenha uma caixa delimitadora Q_{area} ao redor do polígono e gera linhas paralelas l_p dentro da caixa delimitadora (linha 4). Essas linhas paralelas são separadas entre si de acordo com o parâmetro de distância. Esse parâmetro define a distância entre as linhas. As linhas paralelas são giradas de acordo com o ângulo α da linha formada pela L_{aresta} conforme mostrado na linha 5. Então, entre as linhas 6 e 10 exploramos todos os vértices do polígono e todas as linhas paralelas para descobrir os pontos de interseção i_p entre eles. Depois, modificamos todos os i_p (linhas 11 a 19) adicionando um recuo que é metade da distância entre as linhas. Isso é necessário para evitar as manobras de giro de cada segmento de linha sobre os limites da área poligonal, mantendo o caminho dentro do campo de cultivo delimitado. Cada dois pontos de interseção formam uma linha de segmento (linha 15). Se a linha for par, as coordenadas dos pontos são invertidas para criar o padrão de vai e vem (linha 17).

Por fim calculamos os subcaminhos da fase O1 e da fase O3 nas linhas 22 e 23, respectivamente. O subcaminho inicial consiste em um caminho do ponto inicial $P_{início}$ até o primeiro ponto (ponto de interseção) f_p do movimento de vai e volta, passando por todos os vértices intermediários entre os dois pontos. Esse subcaminho também apresenta um recuo a partir dos limites do polígono, evitando passar pelas bordas. O subcaminho P_{final} consiste em um caminho do último ponto l_p do movimento de vai e vem até o $P_{início}$. Ao final do algoritmo, combinamos as três fases para gerar o caminho de cobertura completo, exportando um arquivo contendo um conjunto de waypoints $\{w_1, w_2 \dots w_p\}$.

7 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

A partir da implementação do ORBIO descrita nas seções anteriores foi possível verificar a sua exequibilidade. A partir disso foram realizados experimentos com o intuito de validar a abordagem proposta. Planos de voo contendo rotas de cobertura foram elaborados e voos reais foram realizados sobre um campo de cultivo utilizando um VANT contendo um dispensador acoplado ao seu *frame*. O modelo de VANT empregado nos testes é um multirroto personalizado com quatro motores (um quadricóptero) com um peso de aproximadamente 1,9 kg. O VANT possui quatro motores de 140 W, hélices de 9 polegadas e uma bateria de quatro células de 5000 mAh (14,8 V). O tempo de voo do VANT é de aproximadamente 20 minu-

Tabela 1. Comparação dos tempos de planejamento e execução de voos reais realizados manualmente e pelo aplicativo ORBIO.

Etapa avaliada	Manual	ORBIO
Confecção do plano de voo	maior que 5 min.	menor que 10 seg.
Alteração do vértice do polígono	maior que 1 min.	menor que 5 seg.
Alteração da posição de decolagem e de pouso	maior que 5 min.	1 seg.
Tempo de voo	cerca de 15 min.	cerca de 19 min.
Imprecisão na distância entre linhas (30 m)	18%	1%

Algoritmo 1 - Algoritmo vai-e-volta para controle biológico
Entrada: Um conjunto de vértices $\{v_1, \dots, v_p\}$ e a posição inicial $p_{início}$
Saída: Um conjunto de waypoints $\{w_1, \dots, w_p\}$ e calcule aresta mais longa L_{aresta} do polígono

- 1: Calcular o ângulo α de L_{aresta}
- 2: Crie um quadrado Q_{aresta} que delimita a área do polígono
- 3: Desenhe linhas paralelas lp dentro de Q_{aresta}
- 4: Gire as lp de acordo o ângulo α de L_{aresta}
- 5: Para $i = 1$ até lp faça
- 6: Para $j = 1$ até vp faça
- 7: Calcule os pontos de interseção i_p até lp para cada v_j
- 8: fim para
- 9: fim para
- 10: Para $i = 1$ até i_p
- 11: $d_{recuo} =$ metade da distância entre linhas
- 12: $p_{bf}^i =$ Adicionar d_{recuo} às coordenadas de i_p^{ith}
- 13: $p_{bf}^{i+1} =$ Adicionar d_{recuo} às coordenadas de i_p^{ith+1}
- 14: $linha =$ criar uma linha com p_{bf}^i e p_{bf}^{i+1}
- 15: Se $linha$ for PAR
- 16: Inverta as coordenadas de p_{bf}^i e p_{bf}^{i+1}
- 17: fim se
- 18: fim para
- 19: $fp =$ primeiro ponto de i_p
- 20: $lp =$ último ponto de i_p
- 21: Gerar o sub-caminho $P_{inicial}$ de $p_{inicial}$ para o fp
- 22: Gerar o sub-caminho P_{final} de lp para o $p_{inicial}$
- 23: Combine $P_{inicial}$, p_{bf}^i e P_{final} para gerar o caminho de cobertura completo

Figura 3. Algoritmo vai-e-volta para controle biológico.

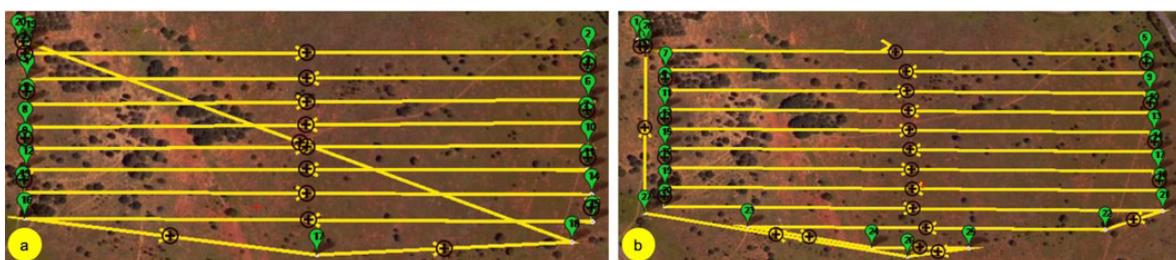


Figura 4. Voos reais realizados nos experimentos: (a) plano de voo elaborado manualmente por profissional com experiência; (b) plano de voo automatizado gerado pela aplicação ORBIO.

tos. A velocidade normal de voo é de 10 m/s, podendo chegar a 15 m/s se necessário. O equipamento é semelhante ao DJI Phantom 4 (DJI, 2024).

As características do VANT permitem a cobertura de uma área de até 30 hectares, embora os planos de voo geralmente não ultrapassem 20 hectares. O controle do VANT é realizado por uma placa controlado-

ra de voo Ardupilot (2024). A Tabela 1 apresenta os resultados com áreas que são retângulos quase regulares para mostrar o melhor caso para o ser humano, mas são minimamente realistas. Essas áreas são de aproximadamente 25 hectares. A distância entre as linhas para o controle biológico foi de 30 metros e a velocidade de voo do VANT foi de 10 m/s.

7.1 Implementação e usabilidade

Para a validação da abordagem proposta, compararam-se os planos de voo automatizados gerados pelo sistema com os planos de voo elaborados por profissionais com mais de cinco anos de experiência, especificamente no uso de VANT e gerenciamento de suas rotas para aplicação de controle biológico. A Figura 4 mostra dois exemplos de planos de voos elaborados nos dois contextos. A Figura 4a mostra um plano de voo gerado de acordo com o método de trabalho atual, ou seja, um plano elaborado de forma manual utilizando as ferramentas disponíveis em softwares de estação de controle. A Figura 4b, por sua vez, apresenta um plano de voo automatizado criado a partir da solução proposta (ORBIO). Diferentes formatos de áreas foram testados e quanto mais irregulares as áreas mais significativa foi a diferença entre o tempo de realização do percurso pelo operador humano, conforme esperado.

Na Tabela 1, os três primeiros resultados apresentados referem-se ao tempo de preparação ou adequação de um plano de voo a partir das informações das coordenadas GPS dos vértices das áreas, tais como confecção do plano de voo, alteração do vértice do polígono e alteração da posição de decolagem e de pouso. Como esperado, o tempo dessa etapa de preparação apresenta uma diferença bastante significativa entre as duas abordagens – manual e automatizada. É importante ressaltar que os polígonos envolvidos são simples e que o operador em questão possui muita experiência na tarefa. Além disso, ressaltamos que a operação de mudança de ponto de decolagem e pouso, que é muito frequente nesse tipo de operação, exige a criação de um novo plano, aumentando circunstancialmente o tempo de preparação quando realizado de forma manual.

7.2. Efetividade

Os experimentos apresentaram um resultado surpreendente na quarta linha da Tabela 1. O tempo de voo que culmina no uso da bateria costuma ser menor nos planos de voo elaborados de forma manual. Porém, analisando os planos apresentados, foi possível detectar uma dificuldade dos operadores humanos em fixar a distância entre as linhas de 30 metros em um valor constante na elaboração do plano de voo. A análise da Tabela 1 evidencia uma imprecisão de 18% na distância entre linhas de voo quando operadas manualmente, indicando dificuldades na manutenção da uniformidade do espaçamento. Esse aumento de espaçamento leva a um percurso reduzido e cobertura mais rápida pelo VANT, porém sacrifica a precisão

em aplicações para o controle biológico, onde é imperativa a distribuição mais homogênea dos agentes.

Em contrapartida, o ORBIO oferece precisão aprimorada na configuração das rotas de cobertura, respeitando rigorosamente a restrição da distância entre as linhas. Tal precisão é ilustrada na Figura 4, que compara os planos sobre uma área idêntica; apesar dos planos visualmente assemelharem-se, as diferenças se manifestam significativamente no tempo de voo e na precisão, com disparidades evidenciadas pela Tabela 1.

8 CONCLUSÃO

O capítulo apresentou as características do aplicativo ORBIO, realizando uma avaliação de desempenho entre a solução proposta e o planejamento manual de rotas. A solução tecnológica é voltada para a automatização da dispersão de agentes biológicos em lavouras utilizando VANT. A interface do ORBIO é projetada para ser intuitiva, permitindo aos usuários gerar rotas de voo otimizadas com simples interações na tela. Testes realizados por pilotos de uma empresa parceira evidenciaram que a versão beta, ainda que disponibilizada restritivamente para validação operacional e coleta de *feedback*, já melhora consideravelmente a eficiência do planejamento de rotas. Resultados iniciais indicam uma melhora da agilidade na criação das rotas e uma redução significativa do erro humano nas distâncias entre linhas, de 18% para menos de 1%, aumentando significativamente a precisão no campo.

Esses avanços prometem aprimorar a aplicação de tratamentos biológicos e, olhando para o futuro, o ORBIO visa explorar o gerenciamento de rotas de cobertura em escala ampliada, procurando estratégias para segmentar extensões maiores em subáreas manejáveis para cobertura por múltiplos voos. Com o compromisso contínuo com a excelência, o ORBIO se prepara para estabelecer-se no mercado como uma solução de software como serviço (SaaS) para agricultura de precisão.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa Instrumentação, à Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul) e à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC). Também, pelo apoio financeiro, à BirdView Drone Bio Control.

REFERÊNCIAS

- ARDUPILOT. 2024. Disponível em: <https://ardupilot.org>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- BARRIENTOS, A.; COLORADO, J., CERRO, J.; MARTINEZ, A.; ROSSI, C.; SANZ, D.; VALENTE, J. Aerial remote sensing in agriculture: a practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. **Journal of Field Robotics**, v. 28, n. 5, p. 667-689, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1002/rob.20403>.
- CABREIRA, T. M.; FRANCO, C. D.; FERREIRA, P. R.; BUTTAZZO, G. C. Energy-aware spiral coverage path planning for UAV photogrammetric applications. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 3, n. 4, p. 3662-3668, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1109/LRA.2018.2854967>.
- CAMPO E NEGÓCIO. **O Brasil é líder mundial em tecnologias de controle biológico?** Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/o-brasil-e-lider-mundial-em-tecnologias-de-controle-biologico/>. Acesso em: 7 jun. 2022.
- DI FRANCO, C.; BUTTAZZO, G. Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 83, n. 3-4, p. 445-462, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10846-016-0348-x>.
- DJI. **Phantom 4**. 2024. Disponível em: <https://www.dji.com/phantom-4>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Controle biológico**. Brasília: EMBRAPA, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-controle-biologico>. Acesso em: 4 abr. 2021.
- FONTES, E. M. G.; VALADARES-INGLIS, M. C. **Controle biológico de pragas da agricultura**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2020.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **New standards to curb the global spread of plant pests and diseases**. Rome: FAO, 2019. Disponível em: <https://www.fao.org/newsroom/detail/New-standards-to-curb-the-global-spread-of-plant-pests-and-diseases/en>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- FREITAS, H.; FAIÇAL, B. S.; CARDOSO E SILVA, A. V.; UEYAMA, J. Use of uavs for an efficient capsule distribution and smart path planning for biological pest control. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, p. 105387, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105387>.
- GITHUB. **Orbio-web/doc**. 2024. Disponível em: <https://github.com/Orbio-web/doc>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- GRÖTSCHER, M.; LOVÁSZ, L.; SCHRIJVER, A. Complexity, oracles, and numerical computation. In: GRÖTSCHER, M.; LOVÁSZ, L.; SCHRIJVER, A. (ed.). **Geometric algorithms and combinatorial optimization**. Berlin: Springer, 1993. p. 21-45. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-642-78240-4_2.
- MACHADO, R. A. O.; MATIAS, N. R. **Sistema e método para liberação de produtos sólidos, a granel ou com invólucro, para controle biológico de pragas na agricultura usando dispensadores acoplados ou incorporados a veículos tripulados ou não-tripulados**. Depositante: Spitfire Multimedia S/S Ltda – Me. Procurador: Cesar Augusto Girardi Figueiredo. BR n. 10 2019 014753 9 A2. Depósito: 17 jul. 2019.
- MAPBOX. **API do Mapbox**. 2024. Disponível em: <https://www.mapbox.com>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- MATTE, I. I.; SANTOS, M. R. F. **Equipamento automático, acoplável em vant, para liberação de pulpa de agentes biológicos em áreas agrícolas**. Depositante: Sirlene Maria de Oliveira (BR/SP). BR n. 20 2019 008594 6 U2. Depósito: 27 abr. 2019.
- NICODEMO, F. G. **Sistema embarcado multiuso para liberação autônoma de agentes biológicos no controle biológico de pragas de precisão**. Depositante: Fernando Garcia Nicodemo. BR n. 10 2019 003863 2. Depósito: 25 fev. 2019.
- NICODEMO, F. G. **Sistema para liberação de agentes biológicos no controle biológico de pragas**. Depositante: Fernando Garcia Nicodemo. BR n. 11 2020 008560 0. Depósito: 21 fev. 2020.
- OBORNE, M. **Mission planner**. 2010. Disponível em: <http://github.com/ArduPilot/MissionPlanner>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- PETER, B. F.; BEITZEN-HEINEKE, W. **Veículo de dispersão em grande superfície, de unidade de dispersão substancialmente esférica contendo organismos úteis apropriados para controle biológico**. Patent BR 10 2014 016416 2 B1. 01 Jul. 2014, 03 Mar. 2020.
- PLAY NO AGRO. **Safra 24: prejuízo superior a R\$40 bi e ataque de pragas**. 2024. Disponível em: <https://playnoagro.com.br/safra-24prejuizo-superior-a-r40-bi-e-ataque-de-pragas>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- EMBRAPA. **Brasil é líder mundial em tecnologias de controle biológico**. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/46366490/brasil-e-lider-mundial-em-tecnologias-de-controle-biologico>. Acesso em: 25 out. 2024.
- RANGEL, R. K. *Development of an UAVs distribution tools for pest's biological control "bug bombs!"*. In: 2016 IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2016, Big Sky, MT, USA. **Proceedings** [...]. New York: IEEE, 2016a. p. 1-8.
- RANGEL, R. K. Development of pest's biological control tool using Vtol UAV systems. In: ICAS CONGRESS 2016, Daejeon, Korea. **Proceedings** [...]. Bonn: ICAS, 2016b.
- TURF. **Turf.js**. 2024. Disponível em: <https://turfjs.org>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- VALENTE, J.; SANZ, D.; DEL CERRO, J.; BARRIENTOS, A.; DE FRUTOS, M. A. Near-optimal coverage trajectories for image mosaicing using a mini quad-rotor over irregular-shaped fields. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 115-132, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11119-012-9287-0>.
- YOUTUBE. **Demonstração da aplicação de planejamento de cobertura com drones (Embrapa/Birdview)**.

2024. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=DWsPhE_rRSk. Acesso em: 10 abr. 2024.

ZHAN, Y.; CHEN, S.; WANG, G.; FU, J.; LAN, Y. Biological control technology and application based on agricultu-

ral unmanned aerial vehicle (UAV) intelligent delivery of insect natural enemies (*Trichogramma*) carrier. **Pest Management Science**, v. 77, n. 7, p. 3259-3272, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1002/ps.6371>.