

GT3 – Perspectivas fluidas das cidades

Aerofotogrametria como auxiliar na inspeção e identificação de danos em edifícios históricos

Dr. Luiz Antônio Cruz Souza (UFMG)
Dr. Willi de Barros Gonçalves (UFMG)
Doutorando Tiago de Castro Hardy (UFMG)

RESUMO

Este artigo discute a utilização de Aeronaves Remotamente Pilotadas (*Remotely Piloted Aircraft -RPA*), como auxiliar para inspeção e identificação de danos em edifícios históricos, utilizando técnicas de aerofotogrametria e modelagem digital. O estudo de caso é a inspeção das coberturas das capelas do Santuário de Bom Jesus de Matosinhos, em Congonhas/MG. Apresenta-se o planejamento do voo considerando questões como estabilidade e a segurança da operação. O método envolveu o processamento de imagens em programa específico de aerofotogrametria e os resultados apresentados tratam da identificação de danos nas coberturas e modelamento tridimensional digital do Santuário. O artigo conclui que o uso de RPAs, possibilita inspeções em lugares de difícil acesso, e que a aerofotogrametria associada com outros métodos como por exemplo utilização de escâner a laser, podem viabilizar levantamentos de construções de interesse cultural de forma precisa, de baixo custo e mais rápida.

Palavras-chave: “Aerofotogrametria”, “Aeronaves Remotamente Pilotadas”, “Identificação de danos”.

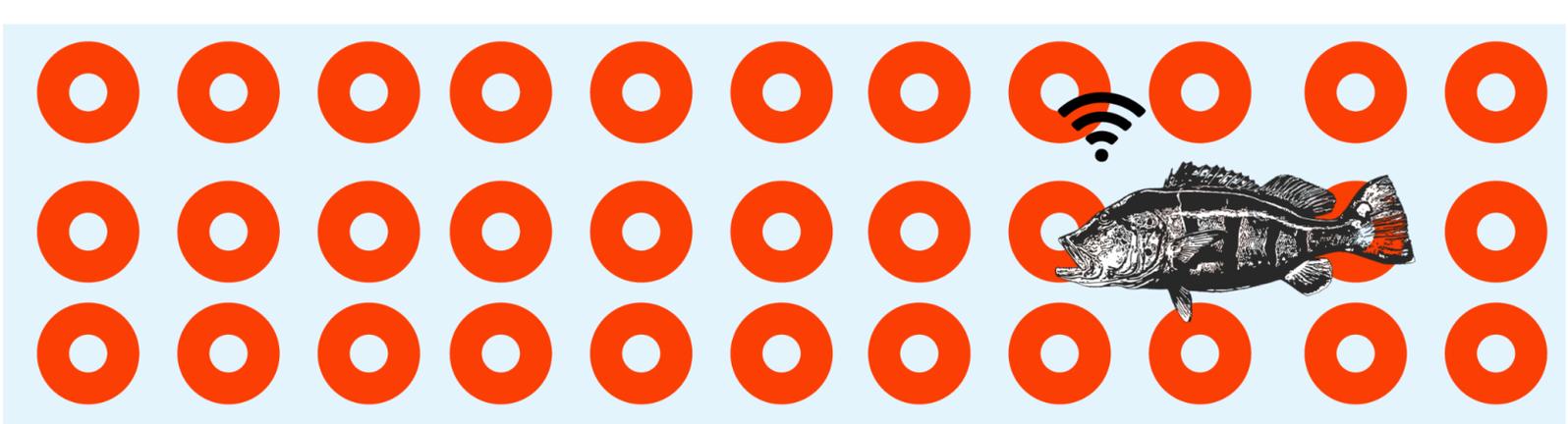
ABSTRACT

This paper discusses using of Remotely Piloted Aircraft (RPA) as an aid for inspection and damage identification in historic buildings, through aerial photogrammetry and digital modeling techniques. The case study is the inspection of the roofs of the chapels of the Sanctuary of Bom Jesus de Matosinhos, in Congonhas/MG. Flight planning is presented, considering issues such as stability and operational safety. The method involved image processing in a specific aerophotogrammetry software and the presented results deal with damage identification of to the roofs and three-dimensional digital modeling of the Sanctuary. The article concludes that the use of RPAs enables inspections in places of difficult access, and that aerial photogrammetry associated with other methods, such as the use of laser scanners, can enable surveys of buildings of cultural interest in a precise, low-cost, efficient and faster way.

Key-words: “Aerophotogrammetry”, “Remotely Piloted Aircraft”, “Damage identification”.

INTRODUÇÃO

O Santuário de Bom Jesus de Matosinhos em Congonhas, Minas Gerais, é um importante



conjunto arquitetônico e artístico, tombado como Patrimônio Cultural da Humanidade pela UNESCO (1985). Composto por uma basílica, capelas e esculturas em pedra-sabão, o santuário é famoso pelos doze profetas esculpidos por Aleijadinho, um dos maiores artistas barrocos do Brasil.

Ao contemplarmos o Santuário de Congonhas, percebemos a grandiosidade e a expressividade das obras de Aleijadinho, que se destacam por sua técnica primorosa, pelo realismo das figuras e pela emotividade transmitida pelas esculturas em pedra-sabão" (SANTOS, 2010, p. 45).

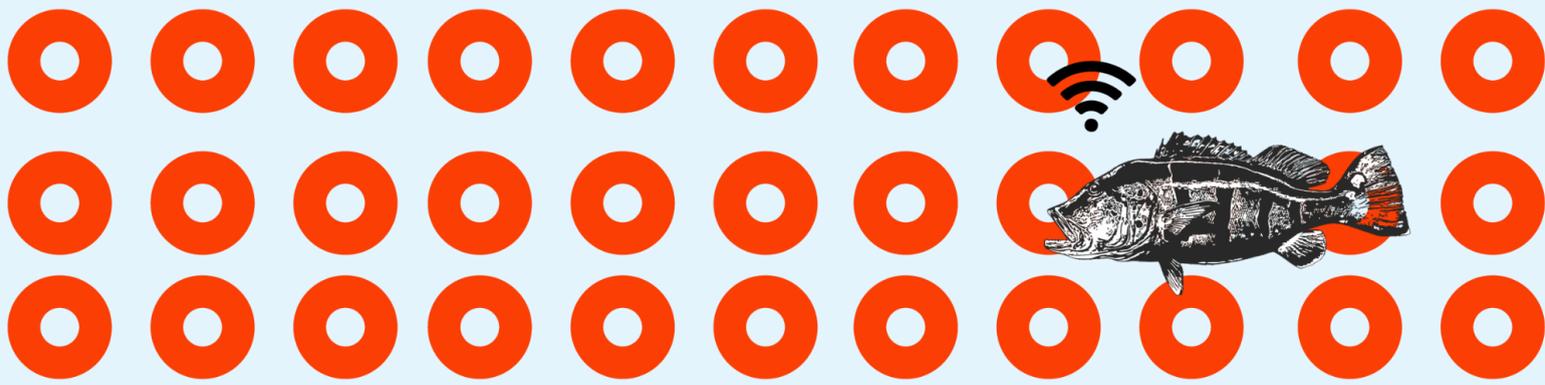
A preservação e conservação do Santuário de Congonhas demandam uma abordagem científica e multidisciplinar para garantir a proteção e a integridade desse importante patrimônio cultural. Diversos estudos têm sido realizados para compreender os desafios enfrentados na conservação do santuário, assim como sua gestão e monitoramento.

A preservação do Santuário de Congonhas é um desafio constante, pois é necessário conciliar a proteção das esculturas e edificações com a visita pública e as condições climáticas adversas da região (ROCHA, 2018, p. 112).

No mês de janeiro de 2022 o volume de chuvas em Minas Gerais chegou a níveis alarmantes em diversas regiões do Estado, com precipitação que durou vários dias e causou diversos impactos em municípios na região do Quadrilátero Ferrífero.

Neste período, no Santuário do Bom Jesus do Matozinhos foram reportados eventos de infiltrações de água na Capela da Ceia, o que demandou intervenção de emergência pela equipe da Prefeitura de Congonhas, com a colocação de lona plástica para impedir que a água caísse diretamente sobre a mesa da Ceia, e também sobre as esculturas em madeira policromada.

O Laboratório de Ciência da Conservação (LACICOR), a Superintendência Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), o Escritório Técnico do IPHAN e a Diretoria de Patrimônio da Prefeitura de Congonhas/MG realizaram uma visita técnica no dia 13 de janeiro de 2022 durante qual foi realizada a documentação com fotografias de luz visível e levantamento expedito de fotografia no infravermelho (termografia) e técnicas de aerofotogrametria realizadas com *Remotely Piloted Aircraft* (RPA).



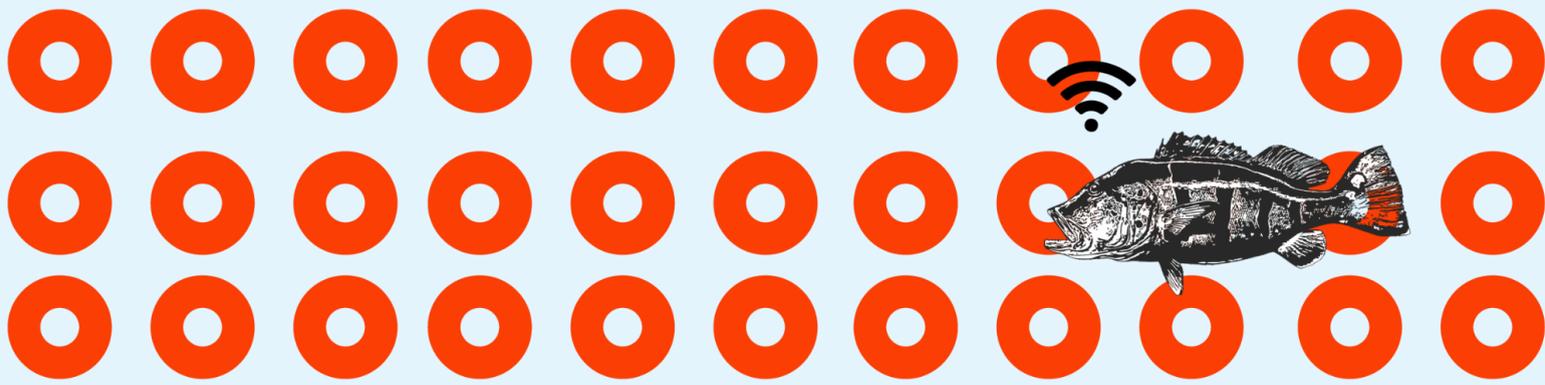
O estado da arte das técnicas de fotogramétricas digitais incluem a obtenção de "nuvens de pontos", seja por imagens fotográficas ou por varredura a laser, recriando objetos 3D e estruturas a partir de uma grande quantidade de pontos referenciados baseados na captação da estrutura real, “essas técnicas têm permitido o levantamento de grande quantidade de informações, de modo mais preciso e rápido se comparado com os métodos tradicionais” (GROETELAARS, 2015, p. 49).

A aerofotogrametria é uma técnica cartográfica que consiste na utilização de registros fotográficos aéreos para a obtenção de informações referentes a um determinado local. Atualmente o voo fotogramétrico é realizado por uma aeronave, na qual é acoplada uma câmera de alta resolução, onde as imagens obtidas são processadas com porcentagens de sobreposição o ortomosaico.

Na aerofotogrametria realizada por RPA, as imagens capturadas com câmeras de alta resolução, proporcionando, além das análises de fotografias e filmagens, a geração precisa de produtos cartográficos em ambiente Sistema de Interação Geográfica (SIG). As imagens geradas pelos RPAs são baseadas nos princípios da fotogrametria, obtidas a partir do mesmo ponto, e permitem a visualização de todo o contexto, podendo ser convertidas em imagens 360°, panorâmicas, ortomosaicos georreferenciados, nuvem de pontos e até imagens térmicas, sendo assim resultados semelhantes seriam impossíveis de se obter por meio de um satélite, de um avião convencional ou por um observador no solo (SANTOS, HENRIQUES, et al., 2016). A utilização das Aeronaves Remotamente Pilotadas, para diversos segmentos da engenharia, estão cada vez mais comuns no Brasil e estão demonstrando um ótimo custo-benefício diante, as inúmeras aplicabilidades da ferramenta.

Equipados com câmeras especiais, os RPAs podem gerar imagens que podem contribuir para o monitoramento do patrimônio como inspeções aéreas de coberturas e fachadas sendo acessadas remotamente por um profissional evitando desta forma, riscos operacionais.

A aerofotogrametria obtida por RPA se baseia normalmente na utilização do “drone” para se fazer um levantamento aero fotográfico em diferentes posições, o voo deve ser realizado em linha, para que um software de fotogrametria possa sobrepor as imagens a uma taxa média de



70%, que irá gerar um ortomosaico a partir das fotos obtidas e um modelo 3D em nuvens de pontos. Estes softwares identificam pontos que consideram idênticos em mais de uma fotografia e calculam sua posição estimada, atribuindo para cada ponto, coordenadas X, Y e Z. As RPAs normalmente operam com um Sistema de posicionamento Geográfico (GPS) que identifica as fotografias com coordenadas geográficas proporcionando resultados georreferenciados. O voo pode ser totalmente pré-programado previamente com a utilização de aplicativos específicos para voos autônomos, restando ao piloto conferir o trajeto definido e estando preparado para qualquer eventualidade que possa acontecer, como a perda de sinal, pássaros e ventos fortes.

Calibração da Distância de Amostragem do Solo - Ground Sample Distance (GSD)

Para que seja possível uma análise técnica das imagens coletadas na inspeção, a qualidade das imagens é fundamental. Segundo Grahman e Koh (2002, p.164) para capturar imagens com uma precisão desejada no levantamento aéreo, é necessário fazer uma relação da distância focal e a lente de captura por meio da regra da geometria de semelhança de triângulos. Sendo assim, o GSD é a porção do terreno que será contida em um pixel, ou seja, quanto menor for o GSD menor será a porção do terreno contida em um pixel.

O aplicativo de planejamento de voo PIX4D© (gratuito), além de no próprio planejamento do voo, gerar o cálculo automático do GSD em acordo com equipamento a ser utilizado, no site do aplicativo há uma calculadora de GSD, que calcula a altura necessária em acordo com os parâmetros do equipamento, conforme (Figura 1). Nota-se que para uma melhor acurácia de resultados, é necessário a utilização de pontos de controle, que são marcadores artificiais ou naturais (em solo), que devem ser georreferenciados com a utilização de um GPS, com a finalidade de calibrar as, com marcadores artificiais ou naturais.

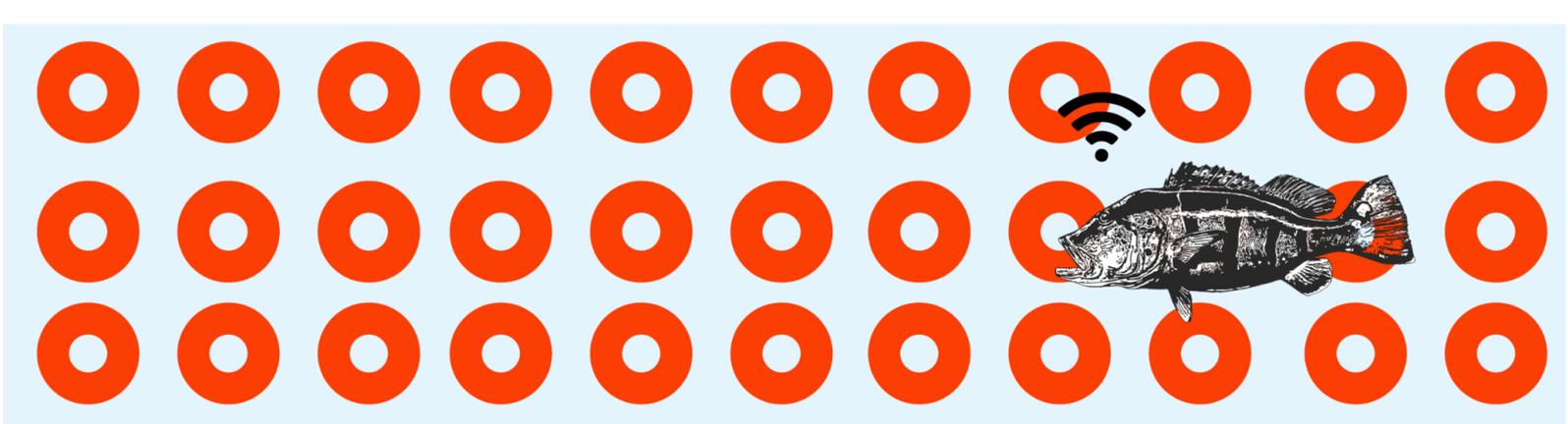
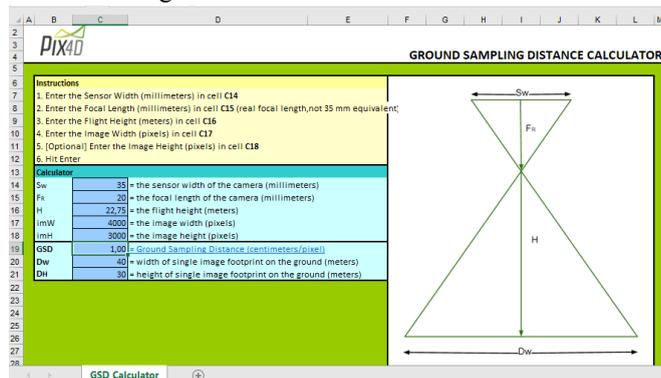


Figura 1 - Calculadora de GSD online



Fonte: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560249-TOOLS-GSD-calculator>

Pontos de controle

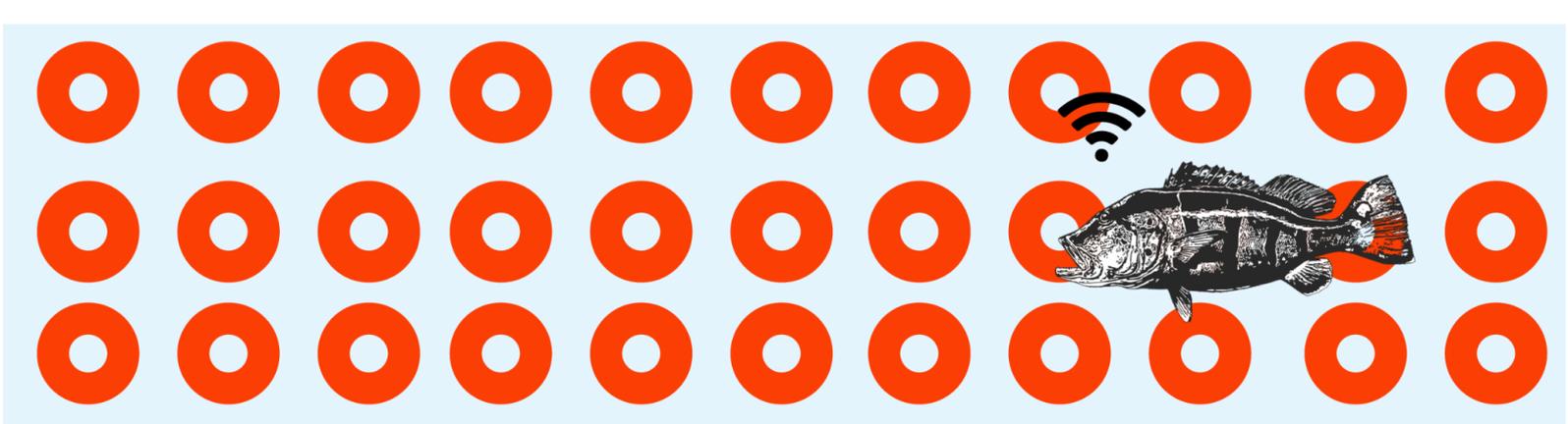
Os pontos de controle são coordenadas conhecidas em solo que auxiliam os softwares calcularem a posição da câmera no instante da captação das fotos, o que resulta em modelos com mais precisão. Os GPS integrados na maioria das RPAs, não possuem alta precisão, mas já existem drones que contam com GPS – RTK ou PPK¹, os quais são capazes de gerar levantamentos precisos sem o uso de pontos de controle.

As formas do ponto de controle, podem variar, mas geralmente é um alvo em forma de X, mas também pode ser um ponto natural ou artificial desde que seja identificável nas imagens.

Aplicativos de planejamento de voo

Há diversos aplicativos para o planejamento de voo voltados para a fotogrametria, entre eles se destacam o Dronedeploy©, DJI Ground Station Pró, Mappa©, Precision Flight,

¹ RPAs com sistema PPK voam com um receptor GNSS PPK a bordo que coleta dados de satélites e os registra para recuperação após o voo. Os dados de satélite de um receptor GNSS em uma estação base (terrestre) próxima são coletados e, após o voo, são incluídos nos dados da RPA para corrigir o erro do sinal do satélite, reduzindo a precisão para uma faixa de nível de cm (sub-polegada). RPAs com sistema RTK carregam um receptor GNSS RTK a bordo que coleta dados de satélites e uma estação base estacionária (terrestre) para corrigir com mais precisão a localização da imagem, em tempo real enquanto ele voa. Fonte: <https://wingtra.com/ppk-drones-vs-rtk-drones/> (Acesso em 20 out. 2021).



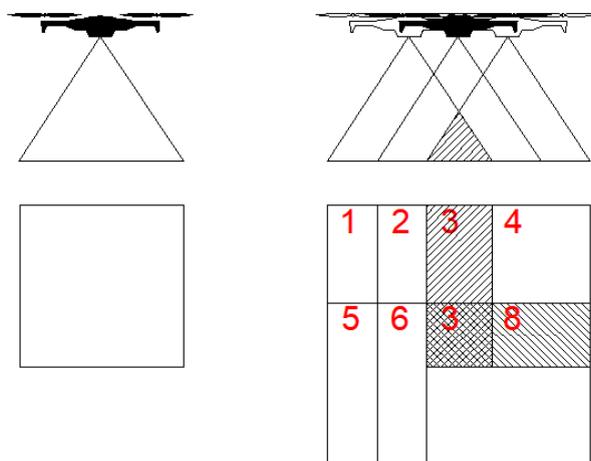
SkyDrones© (gratuito e brasileiro) e o Pix4dcapture© o qual, após alguns testes foi escolhido para ser utilizado nesta pesquisa, por ser de fácil manuseio, gera resultados satisfatórios e é gratuito.

O aerolevanteamento, pode ser feito com o voo manual, mas exige muito da habilidade do piloto e não se pode ter a certeza de que o mesmo voo, poderá ser realizado em outro dia com as mesmas coordenadas.

Softwares para processamento de imagens aplicados à fotogrametria

Um dos softwares para processamento de imagens obtidas por RPA é o Agisoft Metashape©, o qual recomenda para a geração de um modelo 3D com qualidade, uma sobreposição frontal de 80% e 60% de sobreposição lateral das fotografias (Figura 2).

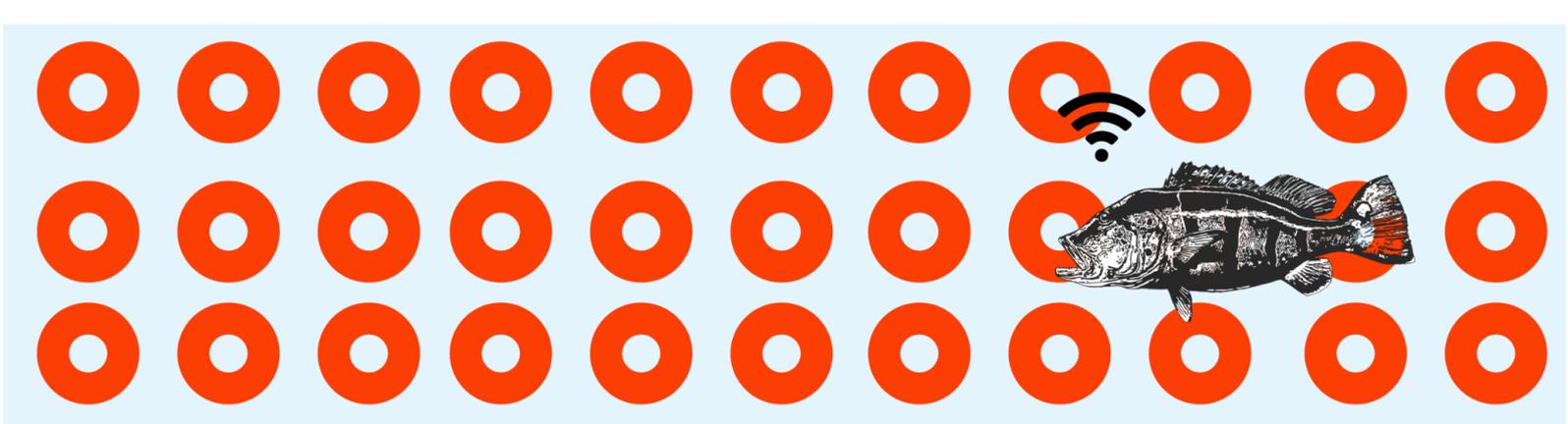
Figura 2 - Esquema da sobreposição de imagens para geração de imagens fotogramétricas



Fonte: Elaborado pelos autores

O *Agisoft Metashape*©, possui uma vantagem em relação a outros aplicativos de processamento de imagens voltados para aerolevanteamento, após o processamento das imagens, o programa gera um novo plano de voo com objetivo de capturar os pontos que falharam durante o processamento, melhorando muito a qualidade do modelo.

O plano de voo, gerado pelo *Agisoft Metashape*©, pode ser exportado para qualquer aplicativo de planejamento do voo.



O *OpenDroneMap* é um software gratuito para o processamento de imagens, possui uma plataforma próxima ao *Agisoft Metashape*®, sendo uma excelente opção para processar as imagens de forma gratuita.

METODOLOGIA E RESULTADOS

Para a realização do aerolevanteamento, foram realizados três voos (sendo dois planejados e um manual) utilizando um RPA, Phantom 3 profissional da marca DJI, equipado com câmera 4k, com objetivo de obter a ortofoto (fotos retificadas) e nuvem de pontos geral do conjunto. Os Voos foram planejados no aplicativo Pix4d em “duplo grid” a uma altura de 120 metros.

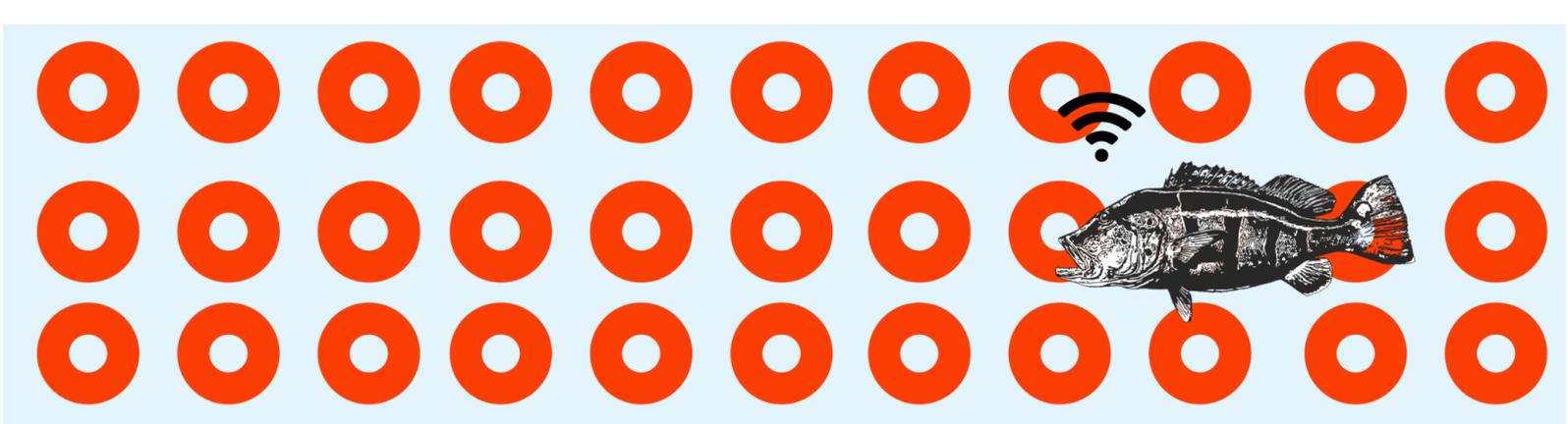
Após o processamento das imagens capturadas, observa-se que a técnica de aerofotogrametria e a obtenção da nuvem de pontos, proporcionou a modelagem 3D geral do conjunto, com medidas reais (Figura 3).

Figura 3 – Resultado do modelo 3D gerado por nuvem de pontos Santuário do Bom Jesus do Matozinhos



Fonte: Elaborado pelos autores

O modelo gerado, pode ser utilizado em programas compatíveis com a metodologia *Build Informating modeling* (BIM), que possibilitam a geração de mapa de danos e acompanhar a gestão e conservação do conjunto.



No voo realizado de forma manual, foram realizadas capturas de imagens bem próximas as coberturas das capelas (Figura 4).

Figura 4 - Capela da Ceia – Cobertura



Fonte: Elaborado pelos autores, voo realizado em 13/01/2022.

Pode-se observar que as perdas nessa camada de proteção, bem como os desprendimentos da camada de tinta aplicada sobre a argamassa de cal e areia, deixam exposta ao relento a camada de argamassa, e junto com as trincas e fissuras das estruturas, aparentemente possibilitaram uma entrada massiva de água nas capelas que apresentam maior grau de fissuras e trincas em suas paredes e cúpulas

O resultado da ortofoto (retificação das imagens capturadas) gerou uma imagem única e com GSD em 5,59 cm quadrados por píxel, o que facilita a obtenção de medidas aproximadas do sítio (Figura 5).

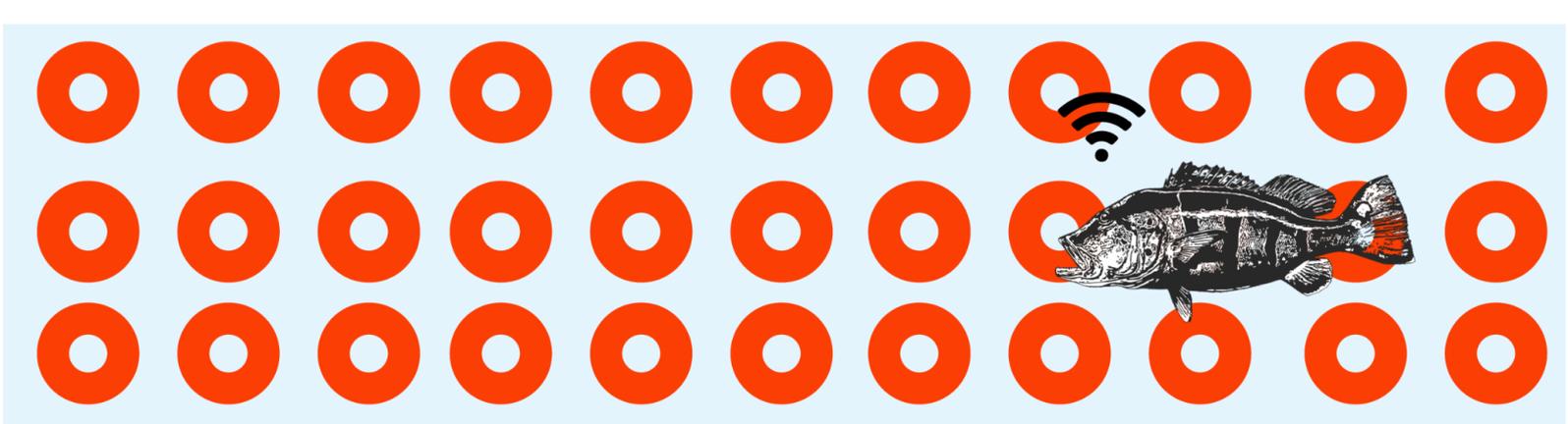


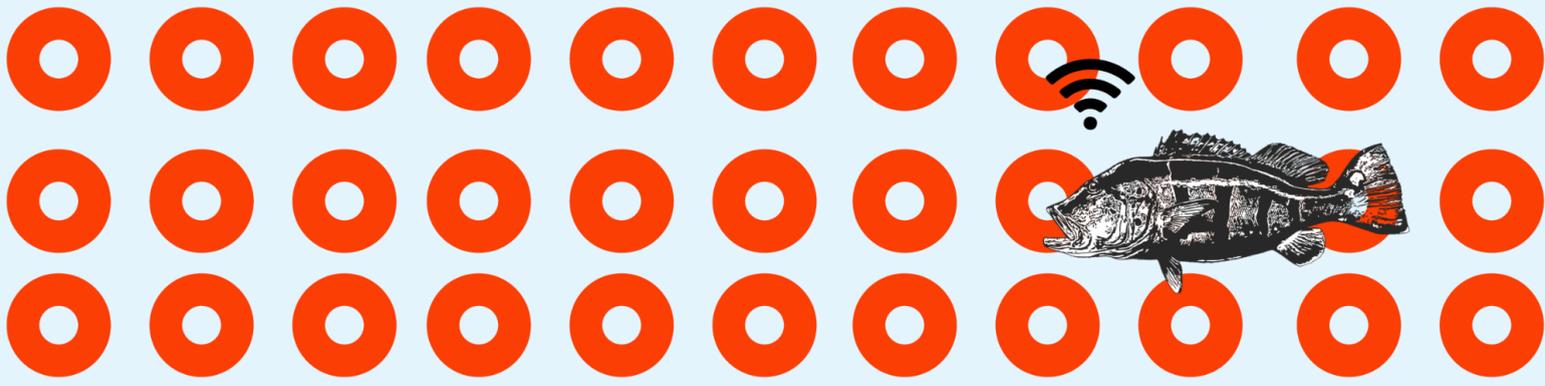
Figura 5 - Ortomosaico elaborado a partir do voo com RPA



Fonte: Elaborado pelos autores, voo realizado em 13/01/2022

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de RPAs na inspeção de edifícios históricos tem se mostrado uma abordagem eficiente e promissora, trazendo benefícios significativos para a preservação e manutenção dessas estruturas. O RPA possibilita realizar inspeções visuais detalhadas de forma rápida, segura e acessível, proporcionando uma visão abrangente das condições dos edifícios, o equipamento permite alcançar áreas de difícil acesso, como telhados, fachadas altas ou partes externas de edifícios históricos. Isso evita a necessidade de equipamentos complexos ou a utilização de andaimes, reduzindo os riscos associados ao trabalho em alturas elevadas.



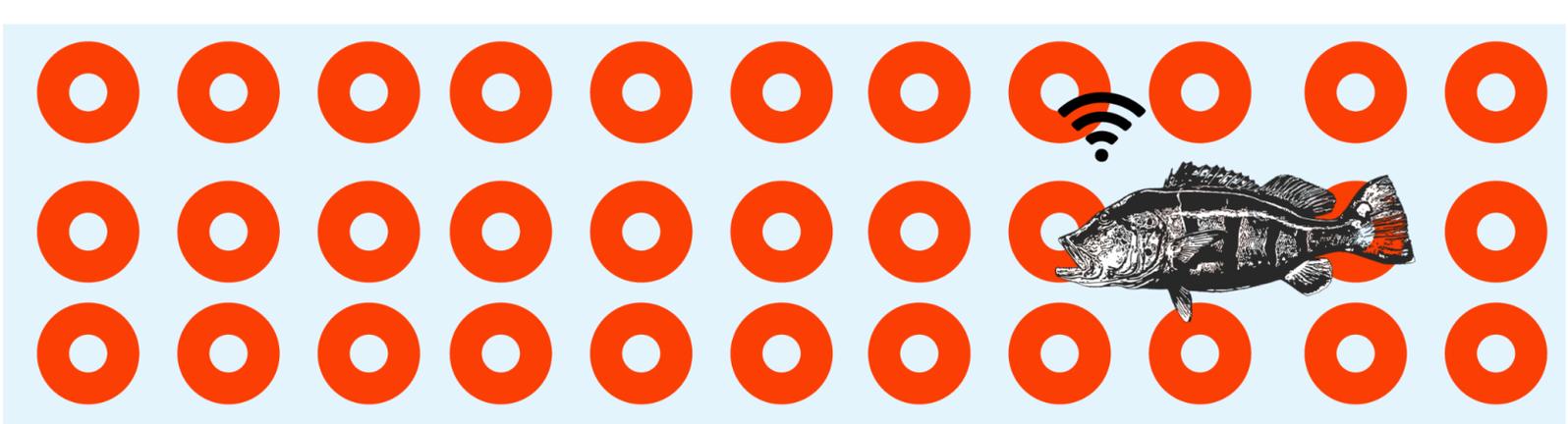
A aerofotogrametria realizada por RPAs é uma técnica eficiente a inspeção de edifícios históricos e tem sido cada vez mais utilizada em projetos de conservação e restauração de patrimônios culturais. A combinação dessa técnica com outras tecnologias digitais pode resultar em modelos 3D detalhados e precisos, além da reprodução de elementos arquitetônicos complexos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Basílica do Senhor Bom Jesus, Santuário do Bom Jesus de Matosinhos, ao Iphan, Superintendência do Iphan em MG, Escritório Técnico do Iphanem Congonhas, a equipe da Diretoria de Patrimônio da Prefeitura de Congonhas/ MG, à Universidade Federal de Minas Gerais e à FAPEMIG e CNPq pelo apoio aos projetos de pesquisa vinculados a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- FERNANDES, G., PEREIRA, L., GONÇALVES, J. Digital technologies for the preservation of cultural heritage: A review. *Journal of Cultural Heritage*, 50, 159-175, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.01.003>. Acesso em: 29 mai. 2023.
- GONÇALVES, J., PEREIRA, L., & FERNANDES, G. Digital technologies for the documentation of tangible cultural heritage: From laser scanning to the creation of 3D models. *Journal of Cultural Heritage*, 26, 101-110, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.01.008> Acesso em: 29 mai. 2023.
- GONÇALVES, W. D. B. Métricas de Conservação e Simulações Computacionais como ferramentas diagnósticas para a conservação preventiva das coleções: Estudo de caso no Sítio Patrimônio Mundial de Congonhas. *Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em artes da Escola de Belas Artes da UFMG*. Belo Horizonte, MG, p. 493. 2013.
- GRAHAN, R.; KOH, A. *Digital Aerial Survey: Theory and Practice*. Nova York: CRC Press



LLC, 2002.

GROETELAARS, N. J. Criação de Modelos BIM a partir de “nuvens de pontos”: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. *Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia. Salvador* : [s.n.]. 2015. p. 372.

ROCHA, João Carlos. Conservação preventiva do conjunto escultórico do Santuário de Congonhas. *Dissertação (Mestrado em Preservação do Patrimônio Cultural) - Universidade Federal de Minas Gerais*, 2018.

SANTOS, Carlos Eduardo. A expressão da fé em pedra-sabão: a iconografia dos profetas do Santuário de Congonhas. *Dissertação (Mestrado em História da Arte) - Universidade de São Paulo*, 2010.

SCHWARZ, Clemens; FLAD, Michael; HÖLLT, Markus; KOLBE, Thomas H. Unmanned Aerial Systems for Architectural Heritage Documentation: Challenges and Opportunities. *Remote Sensing*, v. 8, n. 4, p. 295, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/4/295>. Acesso em: 24 maio 2023.

Como citar este texto:

SOUZA, Luiz A. C.; GONÇALVES, Willi B.; HARDY, Tiago C. Aerofotogrametria como auxiliar na inspeção e identificação de danos em edifícios históricos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ARTE, CIÊNCIA E TECNOLOGIA e SEMINÁRIO DE ARTES DIGITAIS, 8, 2023, Belo Horizonte. *Anais do 8º Congresso Internacional de Arte, Ciência e Tecnologia e Seminário de Artes Digitais 2023*. Belo Horizonte: Labfront/UEMG, 2023. ISSN: 2674-7847. p.1-11.