

Revivendo Brasília Através da Análise de Fotografias Aéreas Históricas

Reviving Brasília Through Analyzing Historical Aerial Photographs

Leandro Faleiros Garcia*, Luiz Felipe Siqueira Marques Rego**, Guilherme Gomes Pessoa***, Rejane Ennes Cicereli****, Marina Rolim Bilich Neumann****, Elton Souza Oliveira*****, Dayana Maia*****, Tati de Almeida*****, Henrique Llacer Roig*****

*Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Laboratório de Geoprocessamento (GeoLab), Brasília, faleiros@unb.br

**Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN, Brasília, luiz.eng.sig@gmail.com

***Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Laboratório de Geoprocessamento (GeoLab), Brasília, guilherme.pessoa@unb.br

****Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Laboratório de Geoprocessamento (GeoLab), Brasília, rejaneig@unb.br

*****Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, marinabilich@unb.br

*****Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, elton.gea@gmail.com

*****Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Laboratório de Geoprocessamento (GeoLab), Brasília, dayana.anfi@gmail.com

*****Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Laboratório de Geoprocessamento (GeoLab), Brasília, tati_almeida@unb.br

*****Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Laboratório de Geoprocessamento (GeoLab), Brasília, roig@unb.br

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v61i1.97242>

Resumo

Este estudo propõe um método otimizado para o processamento e a recuperação de dados digitais a partir de fotografias aéreas da década de 1950, referentes à área do Plano Piloto de Brasília. Em contextos similares, os parâmetros de orientação interna podem não estar disponíveis, e os de orientação externa precisam ser obtidos por métodos não convencionais, visto que a identificação e localização de pontos de controle no campo tornam-se inviáveis em paisagens substancialmente modificadas. Contudo, os avanços em técnicas de visão computacional, incorporados em softwares fotogramétricos modernos, como o Agisoft Metashape, proporcionam uma alternativa eficaz para o mapeamento de fotografias aéreas analógicas antigas. O software processou com sucesso 156 fotografias aéreas, utilizando 17 pontos de controle, que resultou na obtenção de uma ortoimagem e de um modelo digital de superfície históricos, com precisão de média escala. O modelo gerado permitiu a identificação acurada de elementos como cobertura vegetal, uso do solo e características do terreno, contribuindo com informações valiosas para a análise da dinâmica de ocupação da área em estudo. O método proposto demonstra elevado potencial para replicação em casos similares, constituindo uma abordagem robusta para o processamento de imagens aéreas históricas.

Palavras-chave:

Fotogrametria aérea histórica, Visão Computacional, Estruturas de Movimento, Distrito Federal do Brasil, Dinâmica de ocupação.

Abstract

This study presents an optimized method for processing and retrieving digital data from 1950s aerial photographs of the Plano Piloto area in Brasília. In analogous contexts, internal orientation parameters are often unavailable, and external orientation parameters must be obtained through non-standard approaches, as the identification and geolocation of control points in the field becomes impractical in substantially altered landscapes. Nevertheless, advancements in computer vision techniques, integrated into modern photogrammetry software such as Agisoft Metashape, provide a viable solution for mapping historical analog aerial photographs. The software successfully processed 156 aerial photographs, using 17 control points, yielding a historical orthoimage and a digital surface model with medium-scale accuracy. The generated model enabled precise identification of key features, including vegetation cover, land use, and terrain characteristics, providing valuable insights for the analysis of land occupation dynamics in the study area. The proposed methodology exhibits substantial potential for replication in similar cases, establishing a robust framework for the processing of historical aerial imagery.

Keywords:

Historical aero photogrammetry, Computer Vision, Structures From Motion, Brazil's Federal District, Occupation dynamics.

I. INTRODUÇÃO

Os dados de fotografias aéreas, coletados em todo o mundo por entidades civis ou militares, fornecem um valioso registro histórico da evolução territorial, auxiliando na manutenção ambiental e no planejamento urbano (DA SILVA, 2015). Melhorar a capacidade de reconhecer o uso da terra no passado e monitorar as mudanças ao longo do tempo é especialmente vital em países como o Brasil e outras nações em desenvolvimento, proporcionando informações valiosas para compreender a paisagem atual e direcionar os esforços de planejamento futuro. No entanto, a fotografia aérea histórica frequentemente sofre com a degradação, qualidade insuficiente de digitalização e falta de informações essenciais sobre o voo (MAIWALD et al., 2023). Apesar dos esforços contínuos para digitalizar os dados, um dos maiores desafios ainda é a perda de parâmetros originais, especificamente aqueles relacionados à câmera (parâmetros de orientação interna – IOP) e ao posicionamento e orientação das imagens (parâmetros de orientação externa – EOP). Mesmo assim, os avanços nos métodos de processamento de imagens semi-automáticos e o uso expandido de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) começaram a oferecer alternativas algorítmicas robustas para a reconstrução de dados (COGLIATI et al., 2017), entre elas podemos citar técnicas de visão computacional, como Structure from Motion (SfM) e técnicas de correspondência densa de imagens que foram incorporadas ao software de processamento fotogramétrico.

Os esforços para recuperar fotografias aéreas para Ortomosaicos e Modelos Digitais de Elevação, a fim de apoiar estudos sobre mudanças no uso e cobertura da terra, visando investigar crimes ambientais, supressão ilegal de vegetação e expansão urbana, dependem dos parâmetros de voo e da câmera, além de técnicas de pré-processamento, o que torna o processamento de imagens históricas custoso sem informações adequadas (GOMEZ et al., 2015). Um desafio central na visão computacional é a reconstrução de modelos tridimensionais a partir de imagens bidimensionais, destacando a riqueza de informações nos arquivos de imagens aéreas (WESTOBY et al., 2012), (NEBIKER et al., 2014). O método Structure from Motion (SfM) oferece uma abordagem econômica com grande potencial para o processamento de dados fotogramétricos históricos (MAIWALD et al., 2023; COGLIATI et al., 2017; GONÇALVES et al., 2016; ISHIGURO et al., 2016; LOWE, 1999; BROADBENT, 2012; VARGO, 2017).

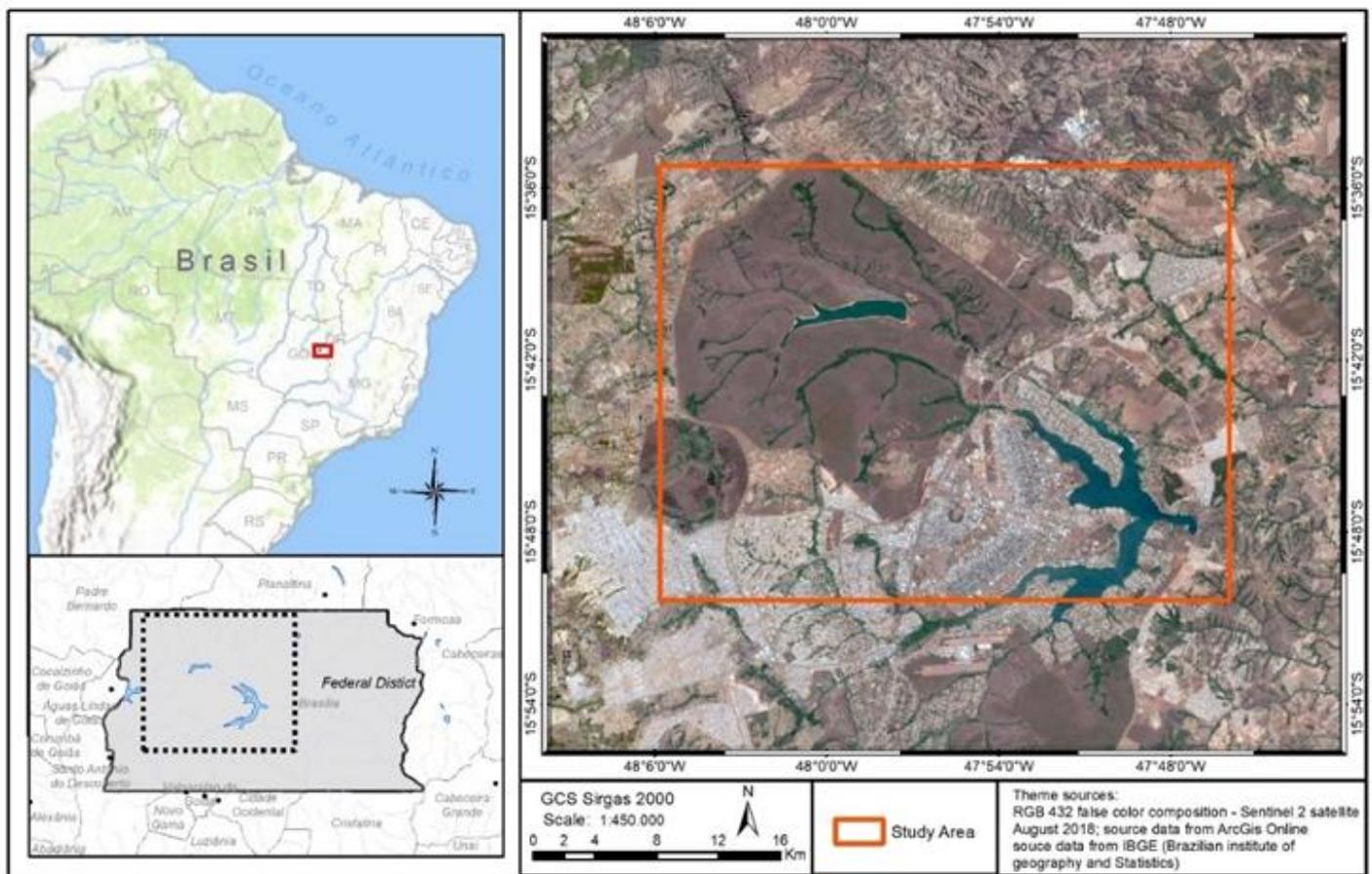
A ideia de transferir a capital do Brasil para a região central remonta aos tempos coloniais, por razões estratégicas e territoriais. Em 1883, um sonho de Dom Bosco sugeriu uma localização entre os paralelos de latitude 15° e 20°, mais tarde interpretada como o local para a nova capital. O presidente Kubitschek iniciou a construção de Brasília em 1956, seguindo as coordenadas de Dom Bosco. Para obter informações valiosas sobre a formação do relevo, o uso da terra e a ocupação da região escolhida para a nova capital, em 1953 foi realizado um levantamento aéreo de toda a área e seus arredores, formando uma vasta coleção fotogramétrica. Apesar dessa extensa coleção de fotografias aéreas, anterior ao estabelecimento do Distrito Federal e de Brasília, informações essenciais para as fotografias dos anos 1950 estão notavelmente ausentes. Especificidades sobre os voos e as câmeras, assim como dados de calibração, foram extraviados ou são difíceis de recuperar. Os negativos fotográficos originais ou filmes fotolitográficos estão desaparecidos, com a única coleção analógica armazenada no Arquivo Público do Distrito Federal. Além disso, algumas fotos analógicas apresentam inconsistências de brilho, resultando na perda de detalhes dos marcos fiduciários, enquanto danos físicos são evidentes em certos casos. Ademais, variações de tamanho e orientação entre as imagens digitalizadas tornam o uso eficaz dessa valiosa coleção ainda mais difícil.

Enfrentando esse desafio, este estudo examina a aplicação de técnicas de visão computacional a fotografias aéreas históricas, nas quais os parâmetros de orientação interna e externa são desconhecidos, com o objetivo de gerar modelos digitais e ortomosaico. O local de construção de Brasília, no Distrito Federal, foi utilizado como estudo de caso.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo abrange a seção noroeste do Distrito Federal, Brasil, conhecida por seus variados padrões de uso da terra (Figura 1). A ampla abrangência geográfica da área oferece uma valiosa oportunidade para explorar as aplicações de suas fotografias aéreas históricas. Ao estudar essas imagens, podemos obter insights valiosos sobre os padrões de uso da terra em evolução, como mudanças na vegetação, transformações na dinâmica hídrica regional, densificação urbana, a conversão de áreas rurais em paisagens urbanas e intervenções em áreas úmidas. Além disso, as fotos fornecem contexto do projeto de implementação do Plano Piloto de Brasília. Esses aspectos nos ajudam a compreender as complexas dinâmicas e relações socioambientais no Distrito Federal do Brasil.



Base de dados das imagens aéreas

Para nossa pesquisa, analisamos 262 fotografias aéreas históricas obtidas em um voo realizado em 1958. Essas imagens foram obtidas do acervo do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília e cobrem integralmente a área de estudo, acreditando-se que tenham sido capturadas por volta desse ano. No entanto, informações relevantes, como o processo de digitalização, os parâmetros de sobrevoo e as especificações da câmera, permanecem obscuras em muitas das fotografias.

O conjunto de dados utilizado neste estudo é composto por fotografias aéreas históricas adquiridas há mais de 60 anos, que foram digitalizadas apenas meio século depois. Esse atraso significativo causou a deterioração das imagens, tornando as marcas fiduciárias inutilizáveis em muitas delas. No entanto, ainda foi possível recuperar as informações sobre a distância focal de algumas fotografias. A Figura 2 apresenta uma fotografia aérea em bom estado, da qual os dados da distância focal foram extraídos.

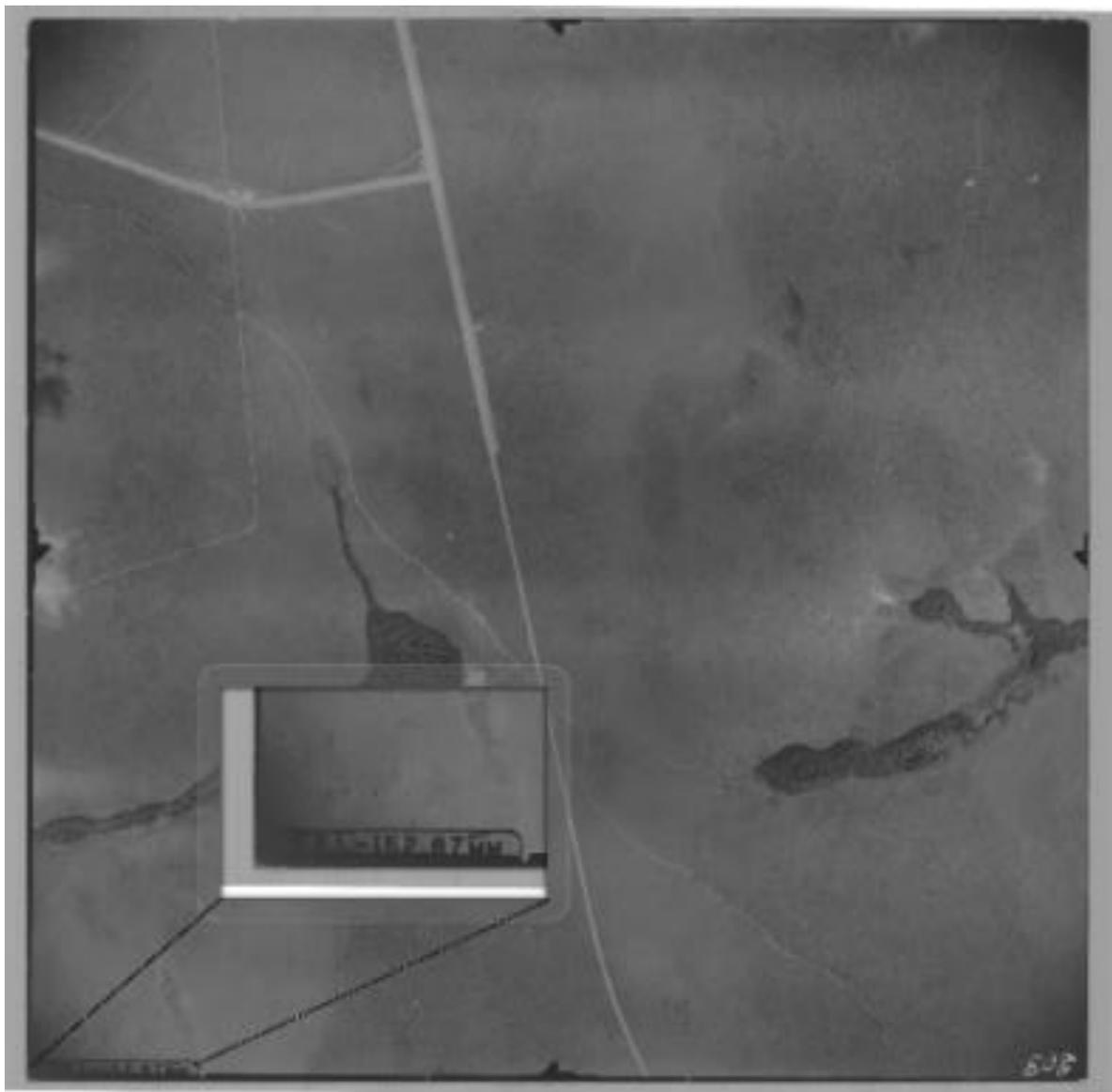


Figura 2 - Detalhe da fotografia original com marcas fiduciárias e distância focal destacadas nos dados analógicos.

Metodologia

Considerando os desafios associados à padronização de fotografias e à identificação de características consistentes entre imagens históricas e contemporâneas—especialmente no contexto de mudanças significativas no uso da terra e na cobertura do solo—desenvolveu-se uma metodologia para realizar o processamento fotogramétrico de fotografias históricas, focando na identificação de pontos de controle que se mantêm estáveis ao longo do tempo. Este método utilizou os softwares Agisoft Metashape e ARCGIS para processar imagens com parâmetros desconhecidos, visando aprimorar a precisão da análise das fotografias, como ilustrado na Figura 3.

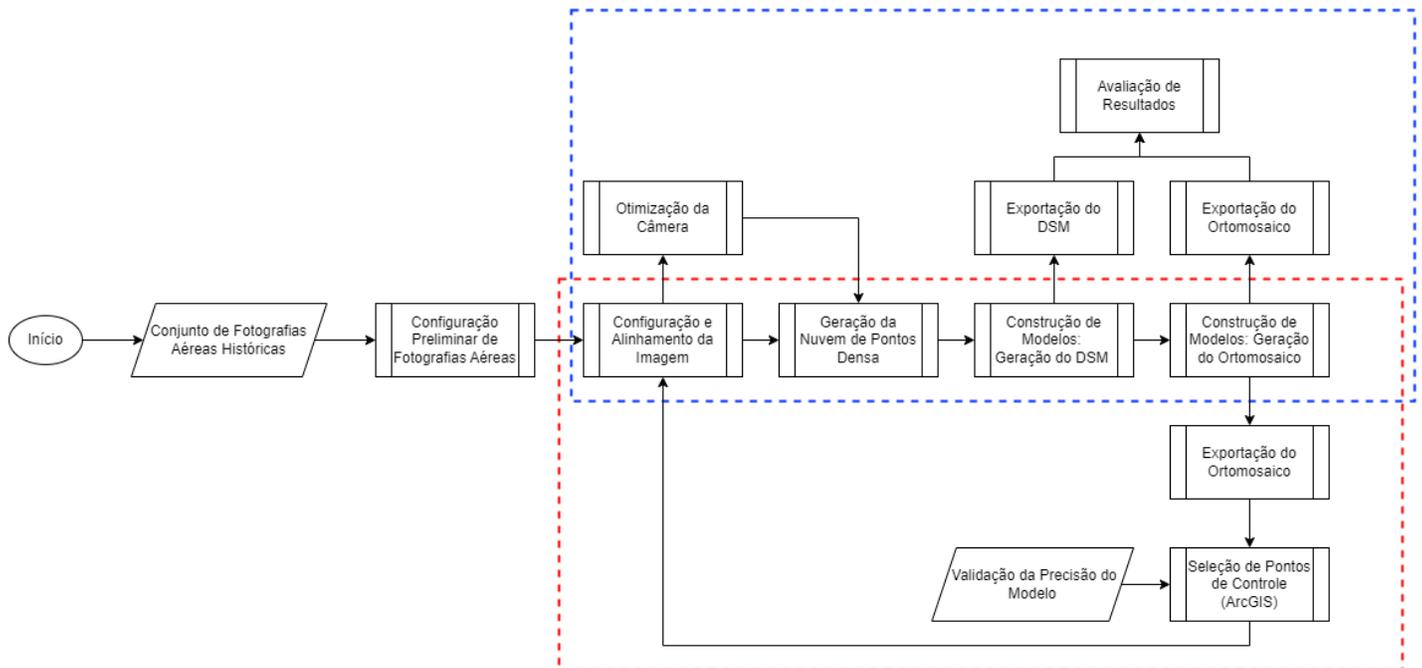


Figura 3 - Fluxograma do Método.

A metodologia proposta utiliza uma estrutura iterativa para a aplicação de procedimentos estabelecidos. Na iteração inicial, o fluxo de processamento fotogramétrico é realizado sem a inclusão de Parâmetros de Orientação Interna (IOP), Parâmetros de Orientação Externa (EOP) ou pontos de controle, uma vez que esses parâmetros não são pré-determinados. Esta fase inclui as etapas descritas em “Configuração Preliminar de Fotografias Aéreas”, “Configuração e Alinhamento de Imagens”, “Geração de Nuvem de Pontos Densa” e “Construção de Modelos”. Em seguida, o ortomosaico gerado e o Modelo Digital de Superfície (DSM) são avaliados em conjunto com dados de referência para facilitar a identificação dos pontos de controle, conforme delineado na etapa “Seleção de Pontos de Controle”.

Na iteração seguinte, os pontos de controle identificados na fase anterior são incorporados ao fluxo de processamento fotogramétrico como marcadores de referência. O fluxo de trabalho, então, prossegue com as etapas “Configuração e Alinhamento de Imagens”, “Otimização da Câmera”, “Geração de Nuvem de Pontos Densa” e “Construção de Modelos”. Essa iteração resulta na produção de ortomosaicos e Modelos Digitais de Superfície (DSM) georreferenciados. Por fim, é realizada a etapa “Validação da Precisão do Modelo”, que envolve uma avaliação abrangente dos produtos gerados em relação aos dados de referência.

a) Configuração Preliminar das Fotografias Aéreas

Este tópico abrange as etapas iniciais para padronizar o conjunto de dados de fotografias aéreas, garantindo consistência entre as imagens. As imagens digitalizadas apresentam variações no tamanho dos pixels, rotação, deformações devido à curvatura do papel fotográfico, inserção de bordas inexistentes e deterioração das marcas fiduciárias. Esses fatores representam um desafio, pois cada fotografia apresenta distorções únicas, tornando as marcas fiduciárias essenciais para uma análise precisa. Infelizmente, o conjunto de dados não forneceu marcas fiduciárias para todas as imagens, o que afetou a capacidade de lidar com essas distorções.

Com o objetivo de padronizar as fotografias, foi aplicado um processamento de imagem para eliminar bordas inexistentes e marcas fiduciárias, uma vez que a ausência dessas informações em todas as imagens torna seu uso inviável. A remoção das bordas visou prevenir a ocorrência de correspondências falsas e a inclusão de pontos de amarração incorretos durante o processamento do bloco fotogramétrico.

b) Configuração do Alinhamento das Imagens

O alinhamento de imagens foi uma etapa automatizada realizada no software Metashape, onde o software identifica pontos-chave em cada imagem e determina as sobreposições entre elas. Esse processo é necessário para criar um mosaico coeso a partir de múltiplas fotografias aéreas.

Inicialmente, as fotografias foram processadas sem qualquer correção ou instrução no bloco fotogramétrico. O processo inicial permite o alinhamento das imagens, formando um mosaico não controlado, o que possibilitou identificar e selecionar pontos com boa estabilidade temporal que podem ser utilizados para determinar pontos de controle para o ajuste do bloco fotogramétrico. Este método ajuda a maximizar a detecção de sobreposições, mesmo quando as imagens estão ligeiramente desalinhadas ou distorcidas.

Durante o alinhamento, foi definido um limite de 40 000 pontos-chave, além de um limite de 4 000 pontos de sobreposição. Esses valores determinam o número de correspondências que o software tenta identificar entre as imagens. Um maior número de pontos-chave pode resultar em um alinhamento mais preciso, enquanto os pontos de sobreposição asseguram que as imagens estejam corretamente interligadas.

A seleção da opção de ajuste do modelo de câmera adaptativo permite que o software ajuste dinamicamente os parâmetros da câmera, visando aprimorar a precisão do alinhamento à medida que mais correspondências são identificadas entre as imagens.

Após o alinhamento inicial, as sobreposições das imagens foram verificadas para garantir o correto alinhamento e a precisão do modelo. Nos casos em que a busca por pontos de amarração foi malsucedida, o alinhamento foi refinado ajustando manualmente os pontos de amarração ou os parâmetros da câmera, visando

alinhar pelo menos 60% das imagens. O processamento deve iniciar com uma precisão média para otimizar o processamento, aumentando para "alta" à medida que mais sobreposições forem detectadas. Por fim, os pontos de sobreposição devem ser integrados ao modelo para assegurar o correto posicionamento das imagens.

c) Otimização da Câmera

O processo de configuração e alinhamento das imagens é necessário para garantir que as fotografias aéreas sejam corretamente combinadas para produzir um modelo digital preciso. Isso envolve a inserção dos parâmetros da câmera, a realização do alinhamento automatizado e a verificação das sobreposições das imagens. Para isso, a distância focal, $F = 152,67$ mm, foi inserida no software de processamento (Metashape) para garantir ajustes de perspectiva precisos e criar um modelo digital exato. Uma vez que os IOP e EOP são desconhecidos, a otimização dos EOPs é possível apenas por meio de georreferenciamento indireto do bloco, utilizando pontos de controle, procedimento realizado na segunda iteração do fluxo de trabalho.

d) Geração da Nuvem Densa de Pontos

A geração da nuvem de pontos e a construção do modelo são etapas fundamentais para a conversão de fotografias aéreas alinhadas em um modelo 3D detalhado. Esse processo consiste em criar uma nuvem de pontos densa a partir das imagens alinhadas, seguida da elaboração de uma malha 3D, que representa a superfície do terreno. A malha 3D é então utilizada para gerar modelos, como os de Modelo Digital de Superfície (DSM) e ortomosaicos, permitindo uma visualização detalhada e análises espaciais avançadas da área.

e) Construção de Modelos

Durante o desenvolvimento dos experimentos, foram produzidos dois modelos, um do tipo DSM e outro do tipo ortomosaico. Na primeira iteração, os produtos foram gerados sem informações de IOP, EOP ou pontos de controle, resultando em modelos com um sistema de coordenadas arbitrário. Na segunda iteração, a inclusão de pontos de controle possibilitou o georreferenciamento do bloco, gerando modelos em um sistema de coordenadas conhecido.

Construção do DSM:

O Modelo Digital de Superfície (DSM) oferece uma representação detalhada da superfície da Terra, incluindo todos os objetos, como edifícios e vegetação. Para criar um DSM, primeiro, as fotos devem ser alinhadas e uma nuvem de pontos densa gerada. Em seguida, a função "Construir DSM" foi utilizada no menu "Fluxo de Trabalho", onde foram definidos parâmetros como resolução e método de interpolação. Uma vez gerado, o DSM foi revisado quanto à precisão e ajustes necessários foram realizados. Por fim, o DSM foi

exportado em um formato adequado para análises adicionais ou integração em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Esse processo permite um modelamento e análise de superfície precisos.

Construção do Ortomosaico:

O ortomosaico é uma imagem composta que integra fotografias aéreas alinhadas e ortorretificadas, criando uma representação da área estudada. O processo de ortorretificação foi realizado considerando o posicionamento e a orientação das imagens determinados na fase de alinhamento, assim como o produto do DSM. Na primeira iteração, tanto o DSM quanto o ortomosaico foram gerados em um sistema de coordenadas arbitrário, em razão da falta de conhecimento sobre IOP e EOP e da não utilização de pontos de controle na fase inicial do processamento.

f) Seleção de Pontos de Controle

O ortomosaico gerado pelo processamento fotogramétrico, sem ajustes, foi importado para o software ArcGIS. Através de uma análise visual do mosaico e levando em conta as semelhanças entre o mosaico histórico e o mosaico de referência, foi selecionado um conjunto de 4 pontos para um georreferenciamento aproximado dos dados. Para realizar o georreferenciamento do ortomosaico, foram considerados os parâmetros de translação, rotação e escala.

A partir do georreferenciamento inicial, foi realizada uma busca visual por detalhes que se mantiveram estáveis ao longo do tempo. Foram identificados dezessete (17) pontos tanto nas fotografias históricas quanto nas imagens recentes obtidas do conjunto de dados de referência do levantamento fotogramétrico aéreo de 2009 do Distrito Federal. Esses pontos foram escolhidos por sua visibilidade consistente em ambos os conjuntos de dados temporais. Os pontos mais confiáveis para uma identificação precisa foram as confluências de cursos d'água e as interseções das redes viárias em seus estágios iniciais de desenvolvimento (Figura 4). Coordenadas tridimensionais foram atribuídas a esses pontos identificados para aprimorar a precisão do modelo. A localização exata desses pontos foi crucial para minimizar erros que poderiam comprometer a qualidade do modelo 3D.

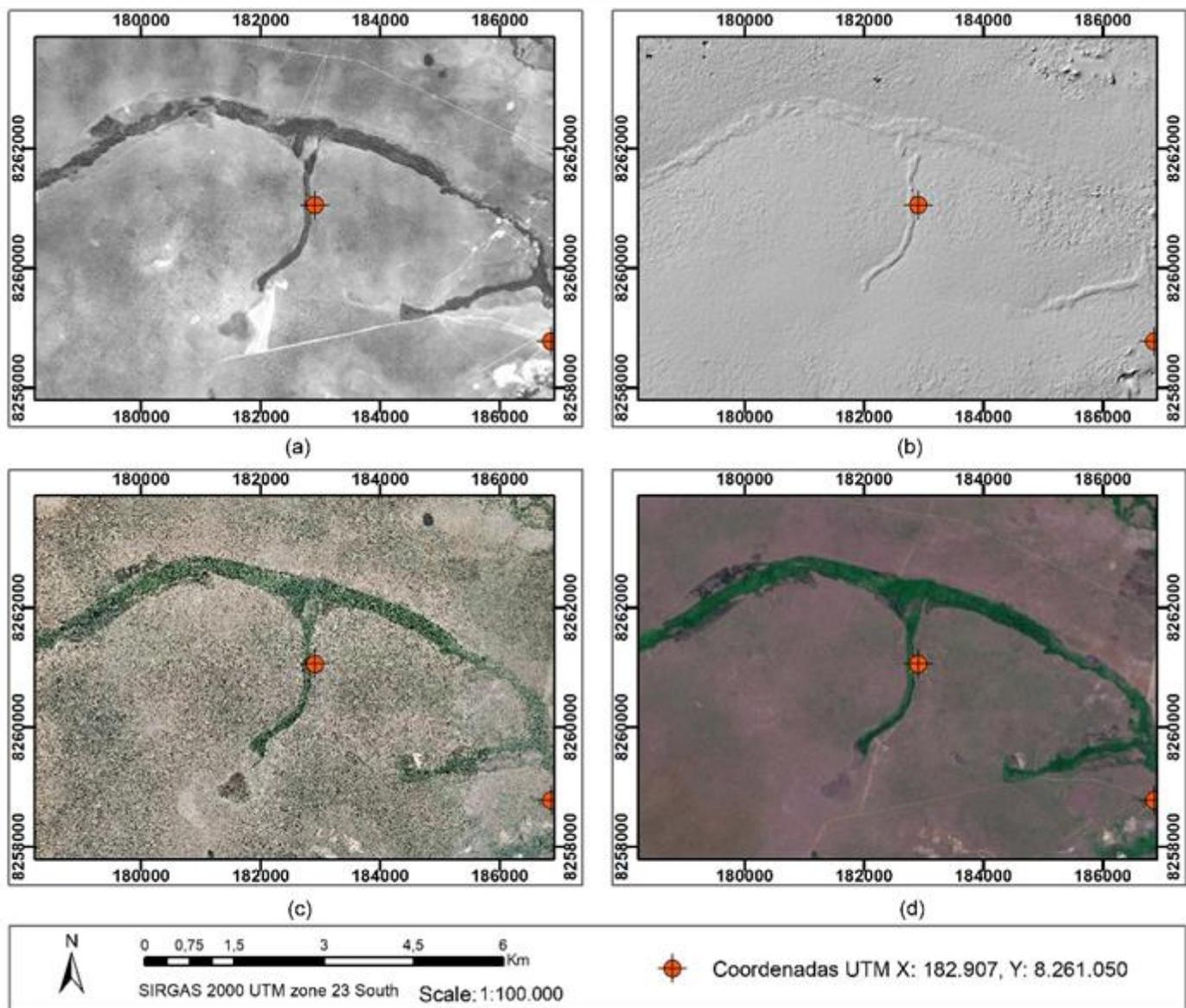


Figura 4 - Representação de diferentes fontes: a) Orto-mosaico de 1959. b) Modelo Digital de Sombreamento Histórico de 1959. c) Ortofotos de 2009. d) Composição RGB do Sentinel 2.

g) Validação da precisão do modelo

Para validar a precisão do DSM histórico, selecionamos uma área de referência no Parque Nacional de Brasília e utilizamos um conjunto de 36 ortofotos do levantamento fotogramétrico aéreo de 2009 do Distrito Federal, obtidas de um repositório de mapeamento governamental de acesso aberto (SEDUH, 2023). Essas imagens foram empregadas para identificar pontos de referência imutáveis ao longo do tempo, essenciais para uma comparação precisa e medição de erros de posicionamento. Em seguida, análises estatísticas básicas foram realizadas nos modelos para uma avaliação mais aprofundada. Para testar o modelo, analisamos as diferenças

nos perfis de elevação de uma área-alvo com qualidade de dados históricos consistentes, abrangendo os anos de 1959 e 2009.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da metodologia proposta serão discutidos considerando as etapas desenvolvidas, organizados nos seguintes tópicos: processamento fotogramétrico não controlado; seleção de pontos de controle; processamento fotogramétrico controlado; e validação do modelo. O primeiro tópico apresenta os resultados e discussões sobre o processamento inicial, no qual os parâmetros IOP, EOP e pontos de controle não foram informados. O segundo tópico apresenta os resultados do processo de busca por pontos estáveis ao longo do tempo, que possibilitam o georreferenciamento do bloco por meio da adição de pontos de controle no processo fotogramétrico. O terceiro tópico apresenta os resultados do processamento fotogramétrico que considerou a inclusão de pontos de controle. O último tópico apresenta a análise de precisão do DSM gerado a partir do processamento das fotografias aéreas históricas.

a) Processamento fotogramétrico sem parâmetros de controle

O processamento fotogramétrico inicial foi realizado com as imagens sem qualquer correção ou ajuste, e sem a aplicação de parâmetros IOP ou EOP. Observou-se que o software conseguiu identificar com êxito as regiões de sobreposição. Entretanto, a ausência de dados de referência geográfica no modelo apresentou um desafio para a uniformização do tamanho dos pixels nas fotografias utilizadas. Essa limitação é uma característica inerente às capacidades do software, sendo influenciada pela quantidade de fotografias que cobrem as áreas contíguas. Essa questão torna-se ainda mais evidente em fotografias sem parâmetros IOP conhecidos previamente.

O processamento fotogramétrico inicial resultou em um ortomosaico e um Modelo Digital de Superfície (DSM). A partir do ortomosaico, é possível identificar características em regiões onde o uso e a cobertura do solo permanecem inalterados. O mesmo se aplica ao DSM, que permite identificar áreas onde a morfologia é preservada, mantendo os valores de altitude. Embora seja viável gerar produtos a partir desse processamento inicial, eles estão em um sistema de coordenadas arbitrário, em função da falta de conhecimento sobre os parâmetros e da não utilização de pontos de controle nessa fase do processo.

A Figura 5 mostra uma região temporalmente estável do DSM e do ortomosaico, tanto nos dados históricos quanto nos dados de referência. É importante destacar que, antes do georreferenciamento, a

comparação entre os produtos só pode ser feita de forma visual, uma vez que não há um sistema de coordenadas conhecido associado aos produtos gerados.

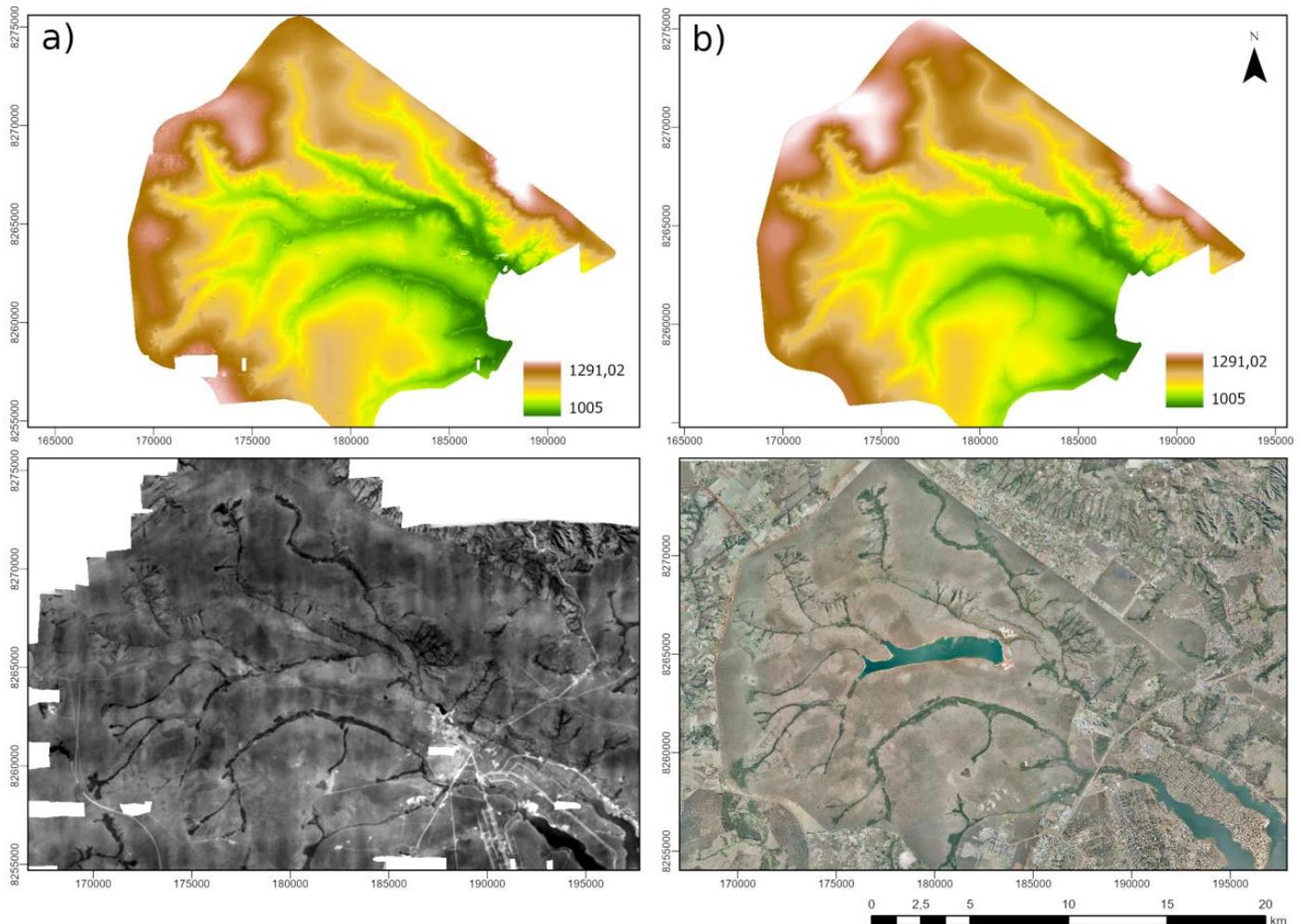


Figura 5 - Análise de Estabilidade Temporal do DSM e do Ortomosaico: a) O DSM Histórico (1959) na imagem superior e o Ortomosaico Histórico (1959) na imagem Inferior. b) DTM de Referência (2009) na imagem Superior, e o Ortomosaico de Referência (2009) na imagem Inferior.

b) Seleção de Pontos de Controle

A precisão do modelo tridimensional dependia da qualidade dos dados de entrada, que não receberam o mesmo nível de processamento meticuloso que os dados bidimensionais. Erros relacionados à rugosidade da superfície foram reconhecidos, particularmente em áreas ripárias, onde o modelo de superfície digital indicava terrenos elevados, impactando os resultados.

A georreferência do Ortomosaico e do DSM foi realizada utilizando ferramentas do ArcGIS, que permitem ao usuário selecionar a transformação a ser aplicada. Nesta etapa, foi empregada uma transformação

afim, considerando o número mínimo necessário de pontos. Primeiramente, os pontos foram identificados e marcados no Ortomosaico, e, em seguida, utilizados para estimar os parâmetros da transformação afim.

A transformação aplicada no ArcGIS possibilita a sobreposição dos produtos gerados com os dados de referência, permitindo a visualização de regiões com um nível de detalhe significativo, o que é suficiente para identificar padrões específicos nas dinâmicas antrópicas da área de estudo. Com base em uma análise visual integrada do relevo (DSM) e da textura (Ortomosaico), foi selecionado um conjunto de pontos de controle, que foram utilizados como referência no processamento fotogramétrico final.

c) Processamento fotogramétrico controlado

Após a seleção dos pontos de controle, as coordenadas dos pontos selecionados foram incorporadas como uma injunção ao processamento fotogramétrico, permitindo que o software ajustasse o bloco fotogramétrico e todos os parâmetros desconhecidos (IOP, EOP e coordenadas dos pontos). Como resultado, ao final do processo fotogramétrico, foram gerados o ortomosaico e o DSM. A Figura 6 ilustra o ortomosaico resultante das fotografias aéreas históricas, enquanto a Figura 8 destaca o DSM Histórico.

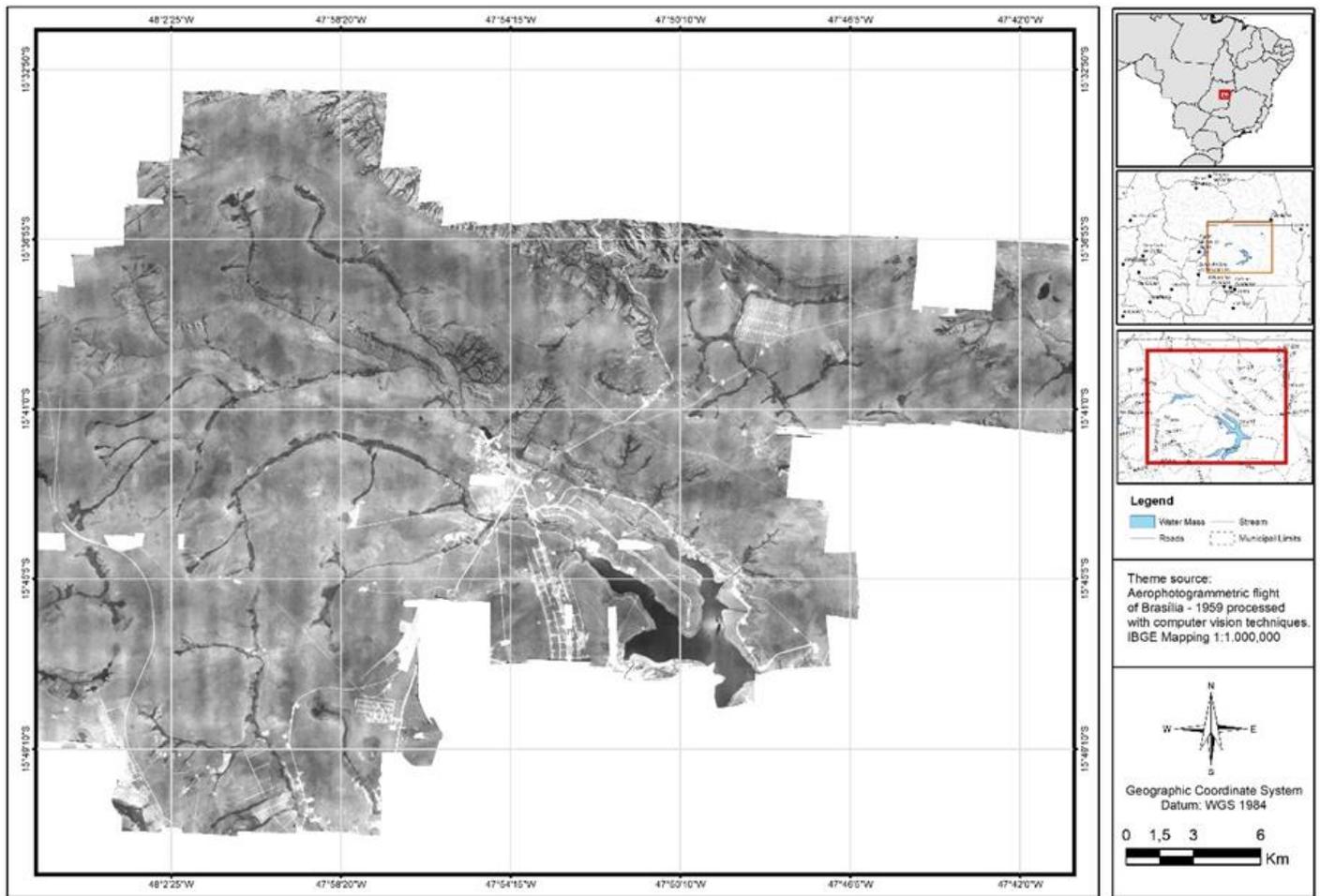


Figura 6 - Ortomoisico histórico gerado à partir de parâmetros de orientação interna e externa desconhecidos.

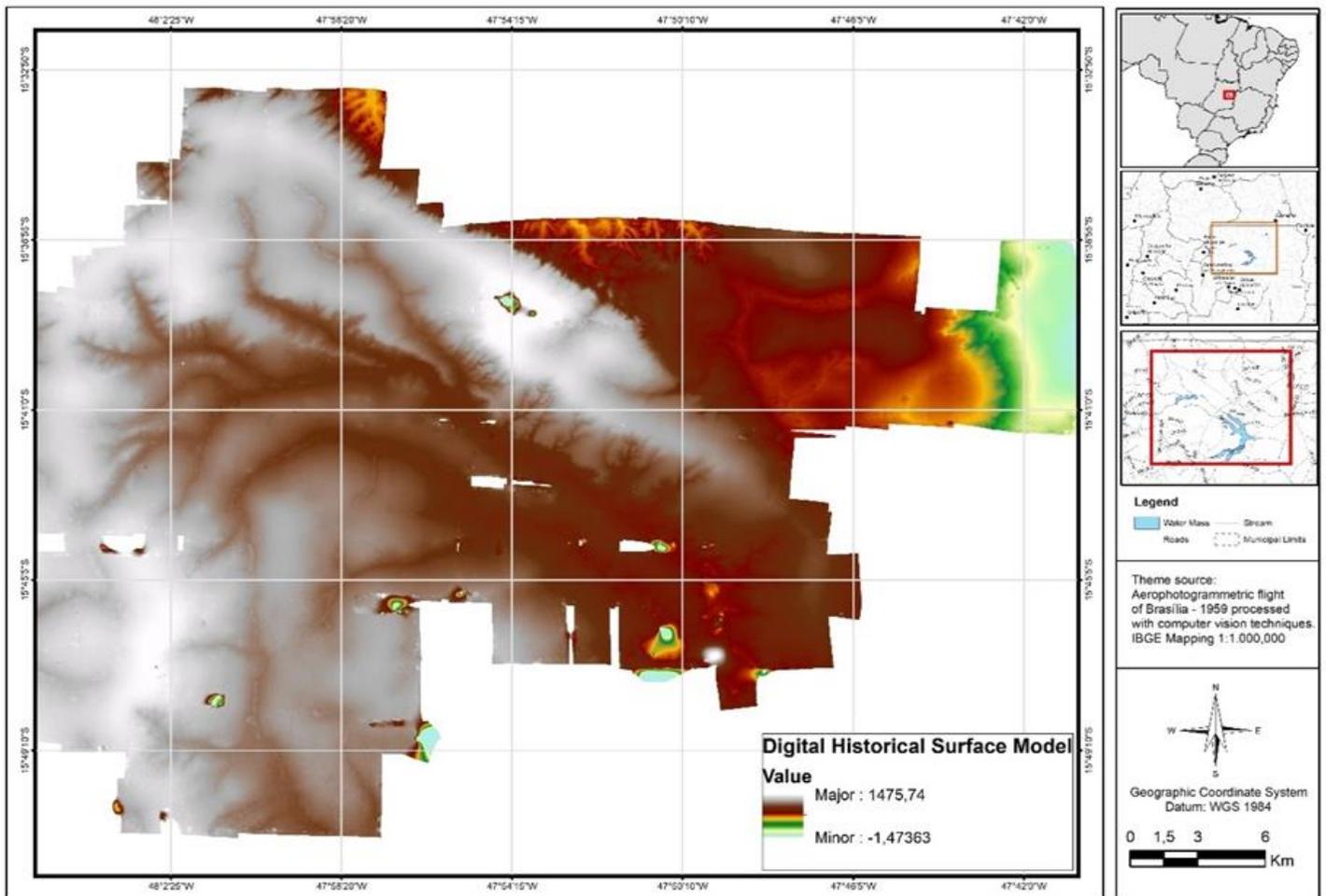


Figura 7 - DSM histórico gerado à partir de parâmetros de orientação interna e externa desconhecidos.

Com base no ortomosaico e no DSM apresentados nas Figuras 6 e 7, é possível observar que algumas áreas podem apresentar ruídos e imperfeições, como valores negativos e regiões sem dados. Em geral, esses efeitos resultam de correspondências falsas no alinhamento das imagens, que podem ser atribuídas a diversas causas. Entre as causas potenciais de correspondências falsas, destacam-se a perda de informações em algumas fotografias, decorrente de um avançado processo de deterioração. Embora esse evento tenha ocorrido em apenas algumas imagens, foi suficiente para gerar falhas de cobertura, resultando em áreas sem informações tanto no ortomosaico quanto no DSM.

Apesar de as distorções no ortomosaico e no DSM se tornarem evidentes em áreas onde as fotografias estão distorcidas ou onde a coleta de dados é limitada, características discerníveis, como áreas de vegetação, alterações no terreno, redes viárias, seções afetadas pelo processo de aterro em curso do Lago Paranoá e a presença de áreas úmidas permanecem visíveis. É importante mencionar que o processo foi capaz de gerar um DSM que oferece uma representação coerente dos dados de elevação.

d) Validação do modelo

A avaliação do posicionamento planimétrico impõe dificuldades, pois a precisão do posicionamento dos pontos foi comprometida por mudanças substanciais no uso e cobertura do solo entre 1959 e 2009. Esse desafio contextual impediu a identificação de pontos confiáveis necessários para a análise, comprometendo assim a validade potencial do exame estatístico subsequente. Além disso, a estimativa de precisão seria significativamente afetada pelo posicionamento dos pontos nas fotografias históricas, invalidando os resultados obtidos.

Ao analisar o ortomosaico gerado, algumas regiões que inicialmente pareciam bem definidas em escalas menores perderam resolução ao aplicar zoom. Nessas áreas, as feições tornaram-se inadequadas para verificar a precisão do ortomosaico, inviabilizando a comparação com os dados de referência. Ainda assim, a variação posicional se manteve dentro de limites aceitáveis em uma escala semi-detalhada (1:25 000), sem erros significativos. Entretanto, como esperado, nas bordas do modelo, as imprecisões posicionais tornam-se mais acentuadas, resultando em deslocamentos notáveis que comprometem sua aplicabilidade.

O DSM foi avaliado considerando uma análise global das discrepâncias e por meio de um perfil altimétrico local. Os resultados e a discussão de cada análise realizada são apresentados na sequência desta seção.

A avaliação global foi realizada por meio da subtração do raster, com os resultados indicando o erro vertical em cada pixel. O DSM Histórico (Figura 8) apresenta um alinhamento sólido com a realidade, capturando de forma confiável áreas de vegetação e outros elementos. O conjunto de dados apresenta uma resolução espacial robusta, evidenciada pela representação consistente de cores e posicionamento preciso na maior parte da área de estudo. Elementos importantes, como vegetação ripária, áreas úmidas, corpos d'água, sistemas viários iniciais e árvores isoladas, são claramente delineados, destacando a capacidade do conjunto de dados em representar a paisagem com precisão.

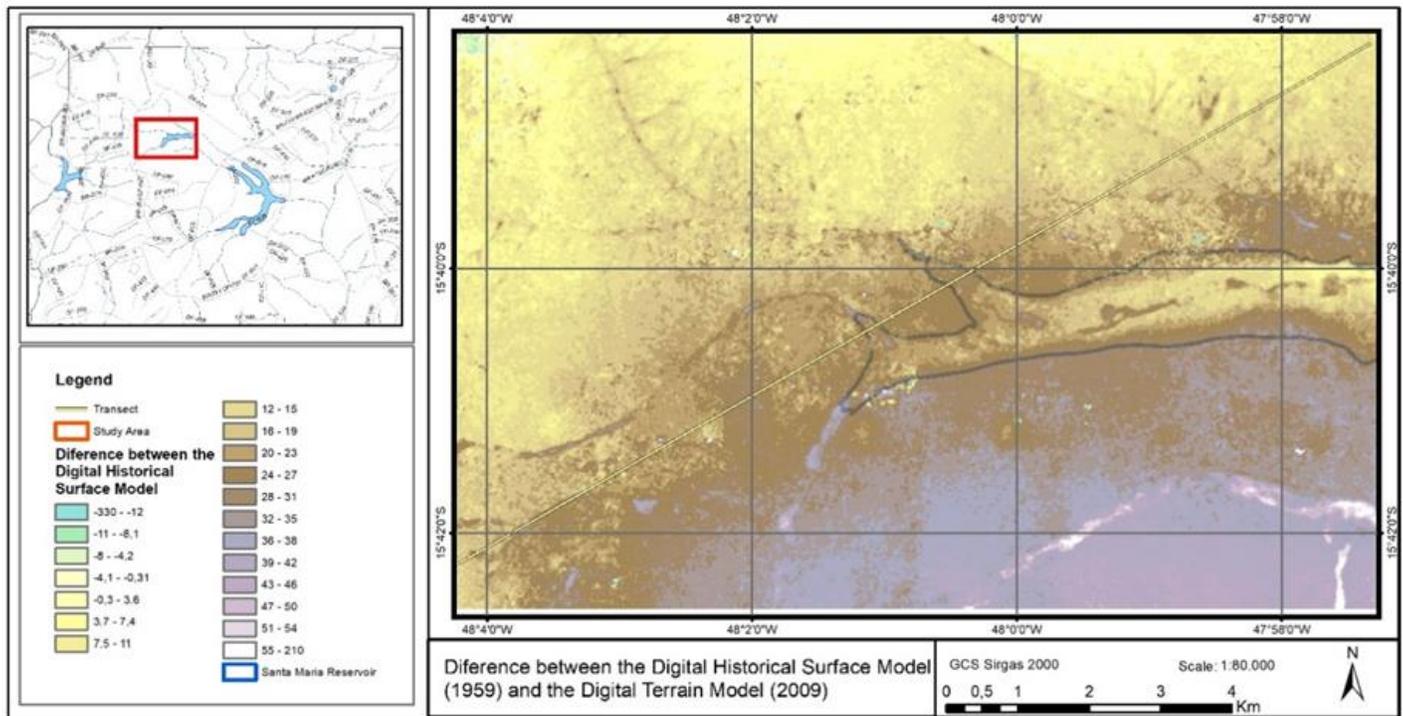


Figura 8 - Diferença entre o Modelo Digital de Superfície Histórico (1958) e o Modelo Digital de Terreno (2009).

De acordo com as normas estabelecidas na especificação técnica brasileira para aquisição e controle de qualidade de dados geoespaciais (CE/DCT/DSG, 2016; DCT/DSG, 2016), que definem protocolos de controle de qualidade para a coleta de dados espaciais vetoriais, pode-se inferir que o conjunto de dados atende aos critérios necessários para a geração de produtos cartográficos com base no modelo digital de superfície histórico. Com base no modelo digital de terreno de 2009, o desvio padrão da diferença é de 11 metros. Isso posiciona nosso modelo histórico na categoria de produtos cartográficos da classe A em uma escala de 1:250 000 ou da classe B em uma escala de 1:100 000 (ver Tabela 1). No entanto, a validação da precisão do posicionamento vertical apresenta desafios devido às disparidades temporais e à limitada precisão na verificação do posicionamento horizontal. A escassez de pontos de controle confiáveis identificados em fotografias antigas impõe limitações a comparações robustas com pontos atualmente identificáveis.

A avaliação da precisão do modelo é particularmente desafiadora devido à natureza dinâmica das transformações no uso do solo ao longo do tempo. Essas mudanças resultam em uma escassez de pontos de controle estáveis, essenciais para garantir um posicionamento geográfico tridimensional preciso e confiável.

Tabela 1 - Padrões de Precisão e Exatidão em MDT para Produção Cartográfica Digital.

1:25 000	1:50 000	1:100 000	1:250 000
----------	----------	-----------	-----------

PEC-PCD (m)	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP	PEC	EP
A	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Fonte: DCT/DSG, 2016.

Para conduzir nossa análise comparativa dos perfis de elevação, selecionamos como área-alvo a represa de Santa Maria, localizada no Parque Nacional de Brasília, devido à sua aparente estabilidade ao longo do tempo. Em seguida, foi delineada uma representação transversal diagonal nessa área, possibilitando a extração de perfis de elevação dos conjuntos de dados de 1959 e 2009.

Ao analisar a Figura 9, é possível notar uma diferença significativa entre os dois modelos temporais, especialmente em áreas com vegetação densa. A variação ao longo desse transecto oscila entre -14 e 12 metros, resultando em uma média de -3,89 metros e um desvio padrão de 3,10 metros. É importante reconhecer que parte dessa variação pode resultar de diferenças nos padrões de cobertura entre os dois modelos temporais. Essa divergência é especialmente pronunciada nas regiões de vale, devido à vegetação ripária. Esse padrão distinto observado, especialmente nos fundos de vale, demonstra o potencial para uma maior precisão na quantificação e uma análise mais profunda, como ilustrado pelos perfis mostrados nas Figuras 10.

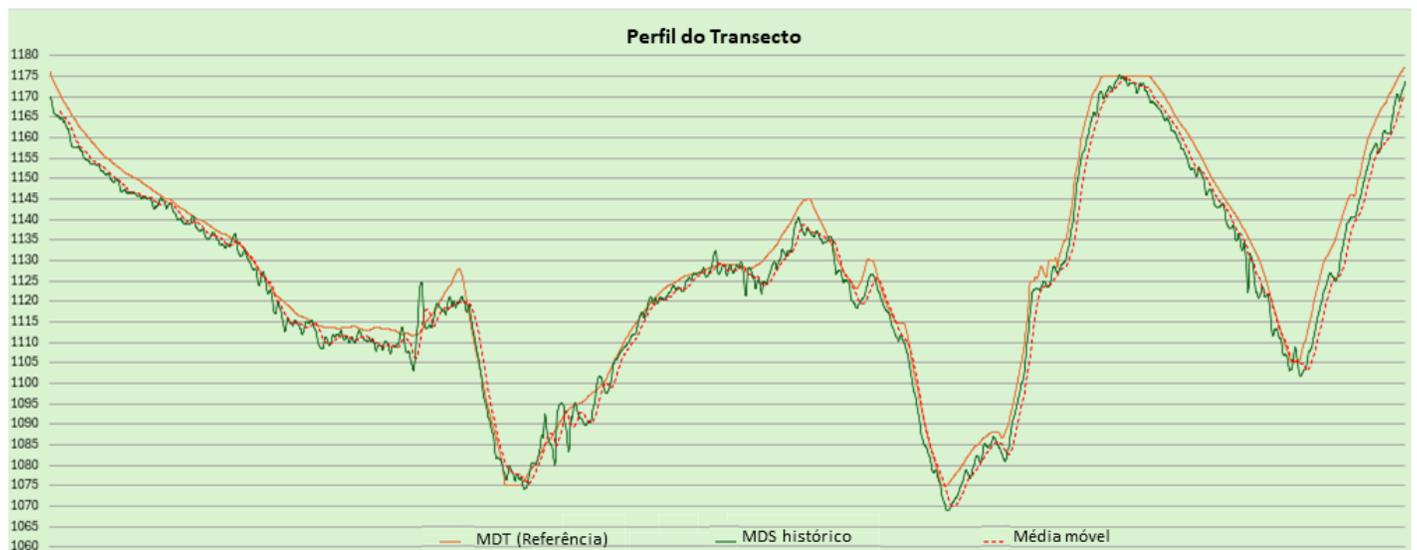


Figura 9 - Comparação do perfil de elevação do transecto dos modelos digitais.

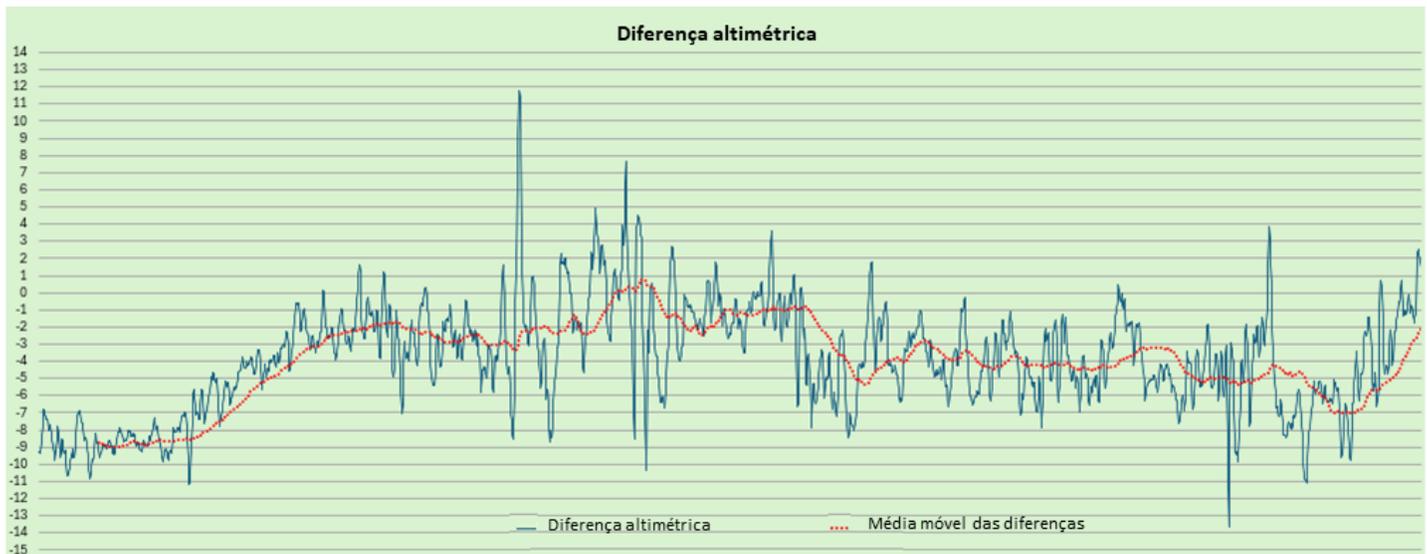


Figura 10 - Perfil de elevação do transecto gerado pela subtração dos Modelos Digitais de 1959 e 2009.

IV. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstra a eficácia da aplicação de técnicas de processamento onde os parâmetros de orientação interna e externa são desconhecidos, utilizando algoritmos de Structure from Motion (SfM), para a reconstrução de informações digitais a partir de fotografias aéreas históricas que carecem de parâmetros de câmera e de voo. Essa abordagem metodológica possibilitou a geração precisa de um Modelo Digital de Superfície (DSM) Histórico e de um Ortomosaico Histórico. Os dados resultantes mostraram-se valiosos e suficientemente precisos para a investigação das dinâmicas socioambientais da região.

Com base nas metodologias delineadas, a tentativa de utilizar inferências para extrair parâmetros artificiais mostrou-se ineficaz na geração de dados com qualidade satisfatória. Em contrapartida, nossa abordagem priorizou a otimização e o refinamento do processamento de dados, permitindo o alinhamento sistemático de 156 das 262 fotografias.

Este método inovador libera o potencial inexplorado nos arquivos de imagens históricas, que foram negligenciados devido à ausência de técnicas de processamento confiáveis. Isso representa um avanço significativo, especialmente em países como o Brasil e outras nações em desenvolvimento, ao aumentar sua capacidade de identificar o uso da terra no passado e as mudanças ao longo do tempo, desde que possuam uma coleção de fotografias analógicas históricas. Ao lançar luz sobre os padrões históricos de uso da terra, esta pesquisa oferece valiosos insights para compreender a paisagem atual e orientar esforços de planejamento futuro.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, e pela Fundação CAPES, que concedeu a bolsa de estudos de pós-graduação.

V. REFERÊNCIAS

COGLIATI, M. et al. Extraction of DEMs and orthoimages from archive aerial imagery to support project planning in civil engineering. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Anais...2017.

DA SILVA, D. C. Evolução da Fotogrametria no Brasil. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 3, n. 2, 2015.

DCT/DSG – Departamento de Ciência e Tecnologia/Diretoria de Serviço Geográfico. Norma da especificação técnica para controle de qualidade de dados geoespaciais – ET-CQDG. 1a. Edição. Brasília, 2016.

CE/DCT/DSG – Comando do Exército/Departamento de Ciência e Tecnologia/Diretoria de Serviço Geográfico. Especificações Técnicas para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais da Força Terrestre – ET-ADGV Defesa FT. 2a. Edição. Brasília, 2016.

GOMEZ, C.; HAYAKAWA, Y.; OBANAWA, H. A study of Japanese landscapes using structure from motion derived DSMs and DEMs based on historical aerial photographs: New opportunities for vegetation monitoring and diachronic geomorphology. *Geomorphology*, v. 242, 2015.

GONÇALVES, J. A. Automatic orientation and mosaicking of archived aerial photography using structure from motion. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XL-3/W4, 2016.

ISHIGURO, S.; YAMANO, H.; OGUMA, H. Evaluation of DSMs generated from multi-temporal aerial photographs using emerging structure from motion-multi-view stereo technology. *Geomorphology*, v. 268, 2016.

LOWE, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. Anais...IEEE, 1999.

MAIWALD, F.; FEURER, D.; ELTNER, A. Solving photogrammetric cold cases using AI-based image matching: New potential for monitoring the past with historical aerial images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 206, p. 184–200, dez. 2023.

BROADBENT, M. *Reconstructing the Past in 3D Using Historical Aerial Imagery*. 2012.

NEBIKER, S.; LACK, N.; DEUBER, M. Building change detection from historical aerial photographs using dense image matching and object-based image analysis. *Remote Sensing*, v. 6, n. 9, 2014.

SEDUH - Geoportal of the State Department of Urban Development and Housing. From: <https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/geoportal/>. Accessed 03/mar/2023.

SEVARA, C. et al. Surfaces from the Visual Past: Recovering High-Resolution Terrain Data from Historic Aerial Imagery for Multitemporal Landscape Analysis. *Journal of Archaeological Method and Theory*, v. 25, n. 2, 2018.

VARGO, L. J. et al. Using structure from motion photogrammetry to measure past glacier changes from historic

aerial photographs. *Journal of Glaciology*, v. 63, n. 242, 2017.

WESTOBY, M. J. et al. "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, v. 179, 2012.
