



**Geração de Modelo de Altura de Árvore Usando Imagens Aéreas
Históricas para o Monitoramento da Regeneração em Floresta Tropical de Mata Atlântica**
Canopy Height Model Generation from Historical
Images for Monitoring of Regeneration in Atlantic Rain Forest

Adilson Berveglieri¹; Nilton Nobuhiro Imai²;
Antonio Maria Garcia Tommaselli³ & Beatriz Fabretti Martinez⁴

¹Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Estatística,
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil

^{2,3}Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Cartografia,
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil

⁴Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Planejamento, Arquitetura e Ambiente,
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil

E-mail: a.berveglieri@unesp.br; nilton.imai@unesp.br; a.tommaselli@unesp.br; beafmartinez@gmail.com

Recebido em: 07/05/2019 Aprovado em: 30/08/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_206_218

Resumo

A reconstrução 3D do dossel de florestas para estudos retrospectivos em longas datas é possível a partir de fotografias aéreas históricas, usando modernos algoritmos fotogramétricos. Isto permite a análise de mudanças estruturais em florestas e o monitoramento do status de conservação ou de regeneração em áreas degradadas ao longo do tempo. Nesse contexto, este artigo realiza a aplicação de técnicas fotogramétricas, combinadas com um modelo de terreno, obtido pelo processamento de uma nuvem LASER, para a geração de modelos de alturas de árvores. Dois modelos, um datado de 1978 e outro de 2017, foram produzidos para avaliar a regeneração de uma floresta tropical de Mata Atlântica. Em seguida, uma segmentação em superpixels foi feita em ambos os modelos de alturas para formar sub-regiões homogêneas no dossel, coincidentes entre as duas datas, e permitir análises estatísticas locais, viabilizando uma classificação em três níveis de altura, a qual foi validada com dados de campo. Como resultado, verificou-se que as áreas desmatadas estão se regenerando, porém apresentam dificuldades para atingir o dossel mais alto. O erro estimado em altura no modelo de superfície histórico foi de 0,55 m, o que é aceitável para os estudos em floresta e é comparável aos resultados obtidos em floresta boreal.

Palavras-chave: Fotogrametria histórica; Reconstrução 3D; Modelo de altura absoluta

Abstract

3D reconstruction of forest canopy for retrospective studies over time is possible from historical aerial photographs using modern photogrammetric algorithms. This enables the structural change analysis in forested areas and the conservation or regeneration monitoring in degraded areas. In this context, the article presents an application of photogrammetric techniques (combined with a terrain model derived from a LASER point cloud) to generate tree height models. Two height models, one dating from 1978 and another from 2017, were produced to evaluate the regeneration of an Atlantic Rainforest forest. A segmentation based on superpixels was made in both heights models to subdivide the canopy into homogeneous regions (coincident between the two dates). A local statistical analysis was conducted based on a classification in three levels of heights, which was validated with data of field. As a result, it was found that deforested areas are regenerating; however, such areas present difficulties to grow to the highest canopy. The error in height, estimated in the historical surface model, was 0.55 m, which is acceptable for forest studies and is comparable to results obtained in boreal forests.

Keywords: Historical photogrammetry; 3D reconstruction; Absolute height model



1 Introdução

As mudanças do dossel florestal ao longo do tempo são um importante indicador sobre o estado de conservação e a dinâmica da estrutura vertical das árvores (Kadmon & Harari-Kremer, 1999). Fotografias aéreas proporcionam a extração de informações detalhadas da cobertura vegetal, bem como medidas tridimensionais, no caso de imagens em estéreo. Para mapeamentos retrospectivos em longos períodos de tempo (até 100 anos), a única fonte de dados possível é o aerolevanteamento com imagens ópticas, as quais foram adquiridas em levantamentos aéreos com câmaras de filme e possibilitam estudos multitemporais com alta resolução. Além disso, a aquisição das imagens em estéreo possibilita a geração de modelos de superfície do dossel florestal, permitindo que medições possam ser feitas para avaliar o desenvolvimento da cobertura vegetal.

Vários estudos usando séries longas de imagens aéreas históricas para a geração de modelos digitais de superfície (MDS) em florestas têm sido realizados (Korpela, 2006; Korpela *et al.*, 2007; Véga & St-Onge, 2008; Nurminen *et al.*, 2015; Vastaranta *et al.*, 2016) para extrair diversos tipos de atributos associados à geometria da floresta. Estruturas florestais podem ser caracterizadas pelas posições das árvores, dimensão vertical e mistura entre tipos de espécies arbóreas. Dados ópticos vêm crescendo em importância para estudos em floresta e, com a combinação com dados de varredura a LASER, podem apresentar mais vantagens, devido ao alto detalhamento espacial (Lang *et al.*, 2006). Korpela (2006) realizou um estudo sobre séries temporais com imagens históricas, considerando vários tipos de dados geométricos e técnicas de orientação de imagem. Em florestas boreais, Korpela *et al.* (2007) conduziram experimentos sobre orientação de imagens em séries históricas, usando pontos de controle determinados a partir de pedras e telhados de construções.

Hyde *et al.* (2006) combinaram estatisticamente a informação estrutural obtida por sensores de varredura a LASER, RADAR e ópticos para gerar dados de altura de dossel e biomassa. Concluíram que o LIDAR (varredura a LASER) foi o melhor sensor para tais estimativas. Véga & St-Onge (2008)

também produziram modelos de alturas de árvores a partir da combinação de dados LASER aerotransportado e fotografias aéreas de séries temporais (1945-2003), neste caso, para reconstruir o dossel de uma floresta boreal. Ni *et al.* (2015) desenvolveram uma abordagem para investigar a geração de modelos digitais de terreno para calcular altura de floresta com base em dados LIDAR e imagens estéreo. Os autores examinaram a distribuição vertical de pontos de correspondência das imagens estéreo em povoamentos de uma floresta decídua. Geraram doze índices de elevação (entre eles, média, mínimo, máximo e percentis) a partir dos pontos de correspondência para medir a elevação da superfície do terreno. Nurminen *et al.* (2015) geraram os MDS em áreas de florestas a partir de séries temporais de imagens aéreas e concluíram que a reconstrução 3D foi possível devido às técnicas de correspondência densa em imagens ópticas. Os erros resultantes em altura foram entre 0,3 m e 2 m.

Estudos para medir e monitorar propriedades estruturais de floresta usando técnicas de sensoriamento remoto baseadas em dados LIDAR e fotogramétricos também foram desenvolvidos por Wallace *et al.* (2016). Seus estudos indicaram que ambas as técnicas foram capazes de fornecer informações para descrever a superfície do terreno e as propriedades do dossel florestal. As alturas das árvores foram obtidas com um erro aproximado de 1,30 m. Vastaranta *et al.* (2016) propuseram uma abordagem para estimar idades em florestas usando uma série temporal de 68 anos, em que MDSs foram gerados para extrair modelos de alturas de árvores a partir de um modelo digital de terreno obtido por varredura a LASER.

Em geral, os vários trabalhos apresentados anteriormente demonstram que atributos estruturais de florestas são importantes e auxiliam no entendimento e monitoramento da dinâmica do dossel florestal. Entretanto, nesses trabalhos, os procedimentos têm sido testados em florestas boreais, onde a vegetação dominante é composta de espécies de pinus, sendo florestas mais homogêneas e com árvores mais esparsas, em que o terreno natural (chão) pode ser visível mais facilmente a partir de uma vista aérea. Diferentemente, as florestas tropicais de mata atlântica têm características de vegetação densa e alta di-

versidade arbórea, o que torna o dossel heterogêneo, ou seja, a copa das árvores tem muita variação entre as árvores vizinhas e o chão raramente é visível.

A abordagem proposta também objetiva o estudo de técnicas para a determinação da orientação de imagens históricas e a geração de CHM (*Canopy Height Model* – Modelo de altura do dossel) denso para estudos retrospectivos em floresta. Neste trabalho, foi analisada uma floresta tropical de mata atlântica cujas características geométricas são muito diferentes daquelas encontradas em florestas boreais. O propósito é realizar um estudo sobre a regeneração de uma floresta nativa, em que algumas partes foram drasticamente desmatadas para extração de madeira. Para atingir este objetivo, uma técnica fotogramétrica para a orientação das imagens históricas é apresentada, o que possibilita a reconstrução do dossel da floresta tropical. Uma combinação do MDS fotogramétrico com dados LIDAR também é feita para produzir um modelo de altura do dossel (CHM). A partir disso, o modelo é subdividido em pequenas regiões, conforme as características locais, para que o estudo da evolução do dossel seja feito em um período de 39 anos. Alguns estudos nessa floresta tropical têm sido desenvolvidos por Berveglieri *et al.* (2018, 2016) para classificar os estádios de sucessão florestal e, adicionalmente, uma análise sobre a regeneração da floresta é realizada neste trabalho.

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos têm proporcionado significativas melhorias no processamento fotogramétrico para a geração de modelos 3D com alta densidade usando técnicas de *dense image matching* (Hirschmüller, 2008) e *structure from motion* (SfM) (Furukawa & Ponce, 2010). Isto viabiliza que aquisições multitemporais de imagens possam ser usadas em procedimentos fotogramétricos para uma análise da cobertura de floresta, considerando sua variação espaço-temporal. A construção de modelos 3D usando arquivos de fotografias aéreas históricas também tem sido investigada por Feurer & Vinatier (2018), que propuseram um método para juntar diferentes blocos de imagens históricas em um único bloco usando o algoritmo SfM. Os autores geraram um MDS temporal com base nas propriedades invariantes das feições. Porém, neste caso, a área de estudo não foi em floresta. Neste tra-

balho, realiza-se a reconstrução tridimensional de um fragmento de floresta tropical de mata atlântica a partir de dados fotogramétricos históricos, em que áreas desmatadas são mapeadas e analisadas para avaliar seu status de regeneração, como será apresentado nas próximas seções.

2 Metodologia

O procedimento para orientação de imagens está esquematizado na Figura 1, em que imagens georreferenciadas mais recentes são usadas para fornecer pontos de controle às imagens históricas. Atualmente, as imagens aéreas são adquiridas com informações fornecidas por receptor GPS ou por GPS/inercial integrados, no caso do georreferenciamento direto. O uso dos dados de posição GPS (e orientação, se disponível) juntamente com pontos de controle possibilitam realizar uma orientação integrada das imagens, produzindo resultados acurados.

A partir disso, se os mesmos pontos de controle puderem ser localizados em imagens mais antigas, então também podem ser usados para a orientação dessas imagens. Contudo, isso raramente acontece no caso de séries temporais longas, principalmente em áreas não urbanas, onde a mudança da cobertura da superfície é mais frequente. Embora não seja tão simples, a solução é identificar, pelo menos, três pontos de controle comuns entre os conjuntos de imagens. Para isso, pontos fotogramétricos, extraídos, por exemplo, em cruzamentos de vias ou rochas permanentes podem ser identificados entre os conjuntos multitemporais. Desse modo, tais pontos fotogramétricos podem ter suas coordenadas 3D estimadas por ajustamento de feixe de raios em imagens mais recentes e servir como pontos de controle para a orientação indireta de blocos de imagens em épocas anteriores. É importante destacar que este procedimento também envolve a determinação dos parâmetros internos da câmara, os quais são estimados de acordo com as características de cada bloco de imagens.

Normalmente, as câmaras mais recentes possuem certificados que fornecem os parâmetros internos nominais para um procedimento de calibração. Porém, há o problema de estabelecer parâmetros de

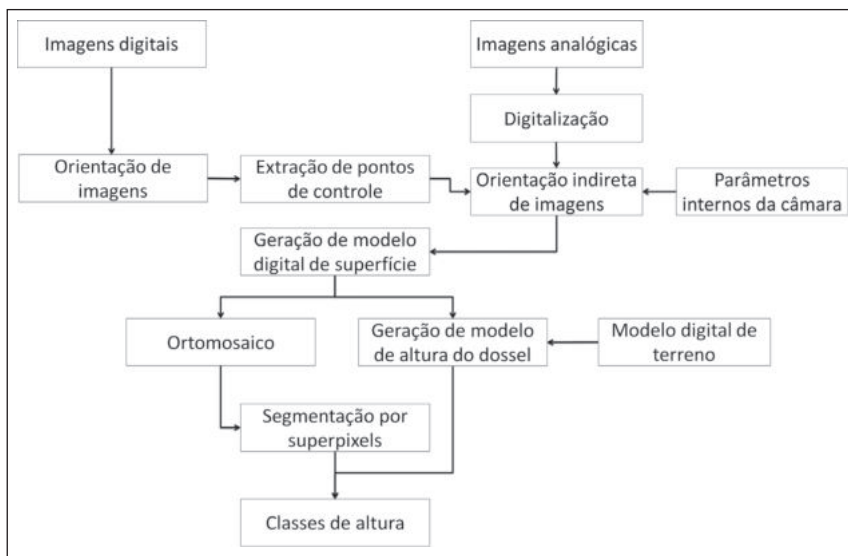


Figura 1 Fluxo fotogramétrico para orientar imagens históricas.

orientação interior para as câmaras antigas que são analógicas e cujos certificados de calibração não estão disponíveis. Neste caso, uma solução é selecionar alguma das imagens de filme do bloco fotogramétrico e usar as coordenadas de suas marcas fiduciais como referência para o ajustamento das demais imagens. Mesmo com esta estratégia, continua sendo necessário o conhecimento da distância focal da câmara. As coordenadas do ponto principal, em relação ao centro fiducial, podem ser consideradas nulas, pois são valores normalmente muito pequenos (menores que 0,02 mm) para câmaras métricas.

Uma vez que as imagens analógicas devem ser primeiramente digitalizadas, o procedimento consis-

te em medir as coordenadas das marcas fiduciais nas imagens digitalizadas (Figura 2) e aplicar uma transformação de corpo rígido para o centro fiducial. Desse modo, as outras imagens digitalizadas do bloco também devem ter suas marcas fiduciais medidas e transformadas e, então, ajustadas em relação à imagem de referência. A redução ao ponto principal, as correções das distorções das lentes e da deformação do filme não são possíveis de serem realizadas devido à falta de dados de calibração. Entretanto, mesmo se corrigidos, os efeitos dessas correções seriam menores que um pixel, o que não afetaria significativamente o georreferenciamento das imagens para aplicações em florestas, em que erros em torno de 1 m são aceitáveis.

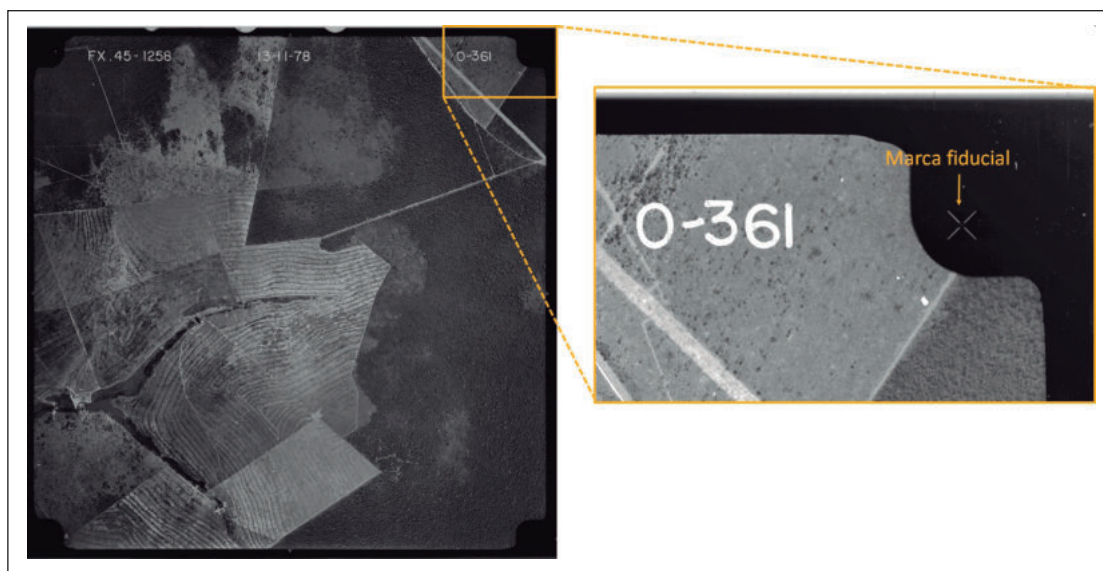


Figura 2 Fotografia analógica com destaque para uma das quatro marcas fiduciais.

Por último, após o procedimento de orientação de imagens digitais ou analógicas, pode ser gerada uma representação 3D do dossel da floresta como um MDS, a qual pode ser usada para estudos, por exemplo, sobre a evolução florestal, monitoramento, cálculo de altura de árvores, impacto ambiental etc. Mesmo nos casos das imagens de filme, um MDS denso pode ser gerado, devido às escalas (1:25.000 – 1:60.000) usuais nos mapeamentos realizados em décadas passadas, as quais podem produzir modelos com resolução espacial entre 0,50 m e 1,2 m. Essas resoluções possibilitam reconstruir uma superfície 3D do dossel florestal com nível de detalhamento suficiente para obter as variações de alturas das árvores.

Dessa maneira, um MDS denso pode ser gerado e, se um modelo digital de terreno (MDT) estiver disponível, a subtração entre ambos os modelos (MDS - MDT) pode produzir um modelo representando somente as alturas absolutas das árvores, isto é, o CHM. A partir desse CHM, a variação em altura é classificada e uma análise do crescimento vertical pode ser feita para o monitoramento da evolução florestal, incluindo as áreas de regeneração e áreas preservadas.

3 Experimentos e Resultados

A metodologia foi aplicada em uma área de floresta que dispõe de conjuntos de imagens fotogramétricas multitemporais e nuvens de pontos adquiridas por sistemas de varredura a LASER aerotransportado, como se apresenta a seguir.

3.1 Área de Estudo

A área de estudo (22°24'51"S e 52°30'50"W) localiza-se em Euclides da Cunha Paulista, São Paulo (Brasil) e consiste de um fragmento remanescente de Mata Atlântica. Este fragmento é formado por uma vegetação tropical densa (13 km²), contém diversidade de espécies de vegetação nativas e apresenta o dossel em diferentes estádios de sucessão florestal. Atualmente, é protegido por leis ambientais e faz parte da Estação Ecológica Mico-Leão-Preto, estando, portanto, sua evolução sujeita somente às ações naturais e aos fatores antrópicos circundantes.

3.2 Dados LASER

Um levantamento aéreo foi realizado com um sistema de varredura a laser aerotransportado (LA-

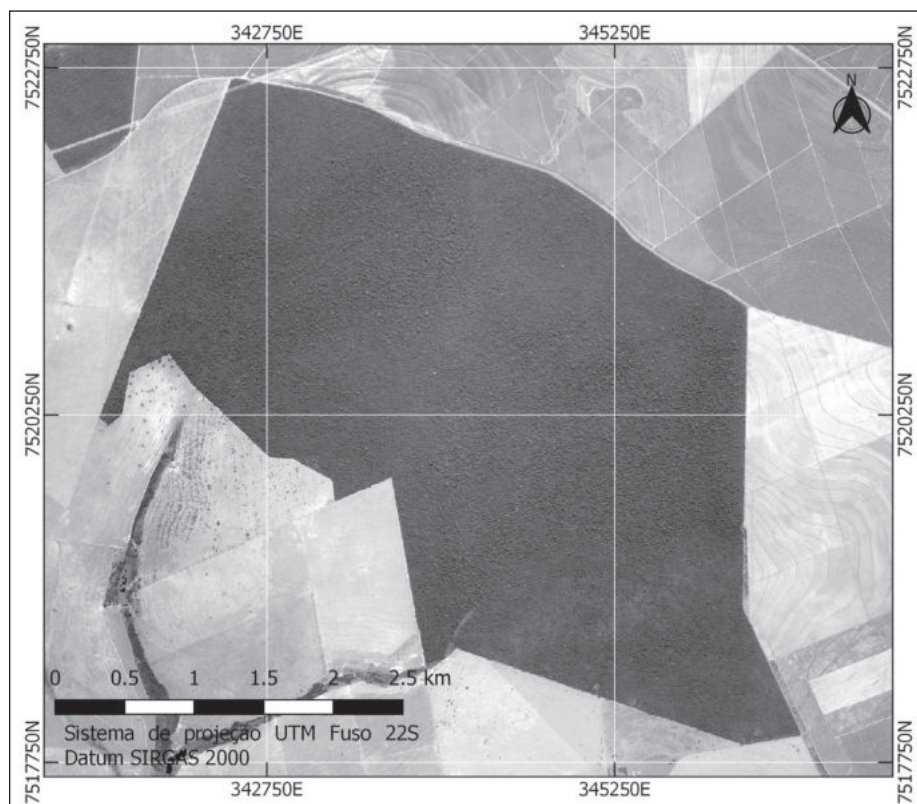


Figura 3
Localização
da área de
estudo.

SER Riegl LMS-Q 680i, GNSS/Inertial Applanix POS-AV 510) para coletar nuvens de pontos a uma altura de voo de 800 m. O equipamento utilizado tem frequência do pulso LASER de até 400 kHz, realiza até 266 mil medidas por segundo no terreno, possui alta velocidade de escaneamento de até 200 linhas/segundo, acurácia de até 20 mm na distância, apresenta um campo de visada de até 60°, utiliza o método de medição por tempo de percurso do sinal, e realiza um processamento *Multi-time-around*, permitindo realizar levantamentos topográficos em terrenos complexos, como é o caso da área de estudo, composta de vegetação densa. Este equipamento grava dados dos diferentes retornos do pulso LASER e da forma da onda, mas para este estudo, somente foi utilizado o último retorno do pulso para extrair os dados do terreno, os quais são obtidos após filtragem de ruídos para definir o terreno ou MDT (RIEGL, 2019).

3.3 Blocos de Imagens Aéreas Multitemporais

Para aplicar a metodologia, três blocos fotogramétricos foram utilizados, os quais são referentes a levantamentos aéreos realizados em 1978, 2010 e 2017. O bloco de 1978 indica o estado de degradação da floresta naquela época (antes de ser protegida por lei), e o bloco de 2017 mostra o estado de conservação e regeneração nos anos recentes. O bloco de 2010, por ser o bloco disponível com data mais próxima ao bloco histórico, foi utilizado para georreferenciar as imagens de 1978. A Tabela 1 mostra os principais detalhes das câmaras utilizadas em cada levantamento, ao passo que a Tabela 2 fornece as configurações dos voos em cada época, indicando altura de voo, sobreposição de imagens e *Ground Sample Distance* (GSD, dimensão do pixel no terreno).

Modelo de Câmara	Distância Focal (mm)	Formato da Imagem	N. marcas Fiduciais	Tipo de Sensor	Ano
Phase One IQ180	55,00	10328 × 7760 pixels	-	Digital (pixel de 5,2 µm)	2017
UltraCam Xp - Vexcel	100,50	17310 × 11310 pixels	-	Digital (pixel de 6 µm)	2010
Wild RC8	152,45	23 × 23 cm	4	Filme (tipo não disponível), digitalizada com pixel de 20 µm	1978

Tabela 1 Detalhes técnicos das câmaras fotogramétricas.

Modelo de Câmara	Altura voo (km)	Sobreposição longitudinal	Sobreposição lateral	N. imagens	GSD (m)	Ano
Phase One IQ180	0,9	60%	40%	280	0.09	2017
UltraCam Xp - Vexcel	7,5	60%	30%	4	0.45	2010
Wild RC8	3,5	60%	25%	8	0.50	1978

Tabela 2 Características dos blocos de imagens.

3.4 Procedimento de Orientação de Imagens e Geração de MDS

A orientação das imagens do bloco de 2017 foi realizada no software Agisoft Metashape (Agisoft LLC, 2019). Este bloco foi adquirido com dados de orientação direta (GNSS/inercial) e somente cinco pontos de controle (circundantes à floresta) foram levantados com receptor GPS para serem utilizados no procedimento de fototriangulação com ajustamento por feixe de raios. Os POIs da câmara foram previamente determinados em procedimento de calibração. A Figura 4 mostra o ortomosaico fotogramétrico, que é o obtido a partir do MDS gerado.

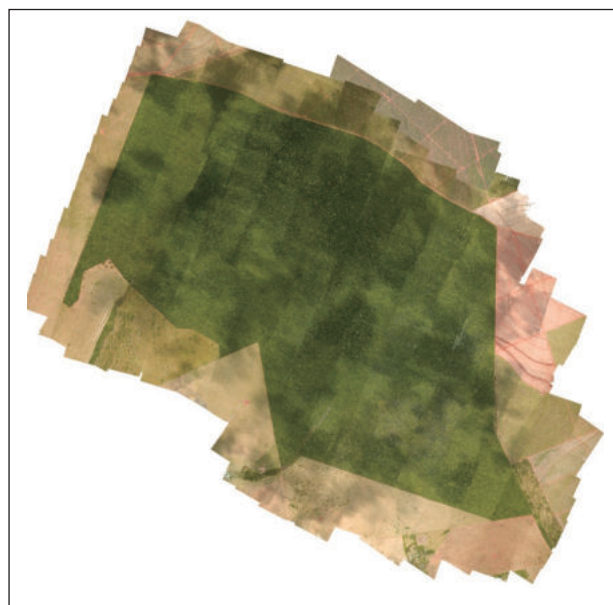


Figura 4 Ortomosaico gerado com o bloco de 2017.

Em relação ao bloco de 2010, este foi coletado com georreferenciamento direto e POIs calibrados. O bloco de imagens históricas (pancromáticas), coletado com câmaras de filme, foi fornecido sem

os POIs da câmara (conhecido somente a distância focal das lentes) e sem os parâmetros de orientação exterior (POEs) (posição e atitude das imagens). Os negativos dessas imagens analógicas de 1978 (fornecidos pela empresa Base Aerolevantamentos) foram digitalizados por um scanner fotogramétrico (UltraScan 5000 - Vexcel) com tamanho de pixel 20 μm , resultando em imagens digitais com GSD de 50 cm. Uma correção do efeito vinhete também foi necessária para melhorar a saturação periférica em relação ao centro da imagem. Então, os POIs foram definidos como apresentado na seção 2, usando as marcas fiduciais, medidas em uma das imagens como referência em relação ao seu centro fiducial. Posteriormente, um processamento fotogramétrico, apresentado a seguir, foi realizado no software *Image Photogrammetry* (Hexagon Geospatial, 2018) para produzir a orientação indireta das imagens históricas e a geração densa dos MDSs.

Nesta etapa, o bloco georreferenciado de 2010 da Figura 5A foi usado como uma referência para extrair pontos fotogramétricos que foram usados como pontos de controle na orientação do bloco de imagens históricas. Pontos comuns, como interseção de estradas e centroides de rochas, foram identificados entre as datas (1978 e 2010) e suas coordenadas foram estimadas pelo ajustamento em bloco por feixes de raios com o bloco 2010, para entrarem como pontos de controle no bloco de 1978.

Para pequenos blocos de imagens, um mínimo de três ou quatro pontos de controle, juntamente com alguns pontos fotogramétricos, podem ser suficientes para realizar a orientação de imagens. O bloco histórico, como mostrado na Figura 5B, foi indiretamente orientado com a seguinte configuração: POIs fixos (distância focal nominal, coordenadas do pon-

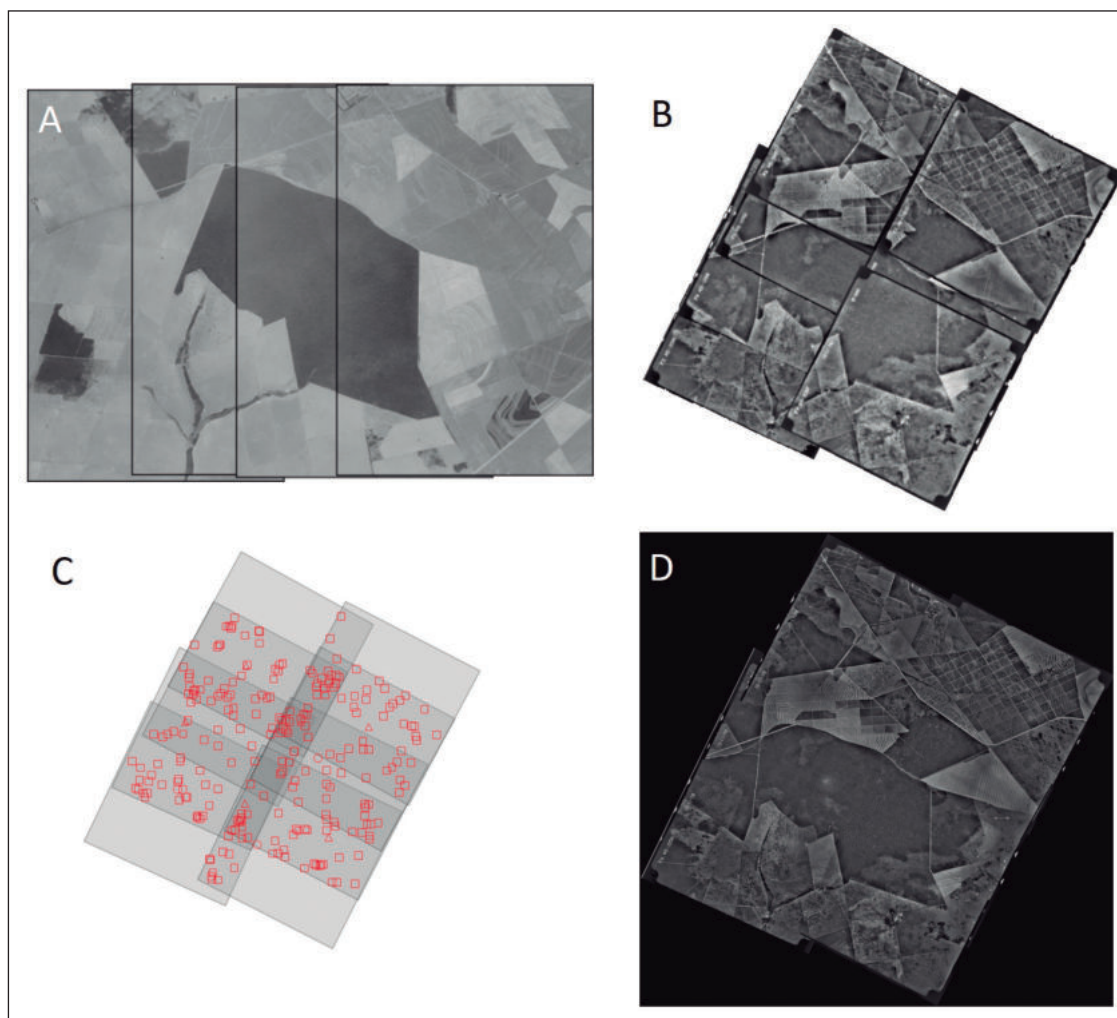


Figura 5 Blocos fotogramétricos; A. De 2010; B. De 1978; C. Geometria do bloco de 1978 triangulado; D. Ortomosaiço do bloco de 1978.

to principal e coeficientes de distorção considerados como nulos), POEs aproximados; desvio-padrão de 0,5 m no espaço objeto e 0,5 pixel no espaço imagem. Três pontos medidos nas imagens foram usados como pontos de controle (vertical e horizontal) e outros três pontos como controle vertical, os quais foram estimados como pontos fotogramétricos no bloco de 2010. Os pontos de passagem dos blocos (pontos fotogramétricos) foram gerados automaticamente usando uma distribuição de 25 pontos por modelo (Figura 5C). Desse modo, o procedimento foi realizado com seis pontos de controle, resultando em uma precisão de aproximadamente 1 m no ajustamento por feixes de raios. A raiz do erro quadrático médio (REQM) para os pontos de controle no espaço objeto foi calculada e resultou em 0,56 cm em X; 1,51 cm em Y e 15,6 cm em Z. No espaço imagem os resíduos foram aproximadamente 0,7 pixel. Tais resultados são suficientes para a aplicação técnica da abordagem. A partir da orientação do bloco de 1978, o MDS denso foi produzido no software Imagine Photogrammetry usando a técnica “*Automatic Terrain Extraction Technique*” com estratégia de correspondência para áreas de florestas. A configuração foi feita com janela de busca de 17×3 pixels para diferenciar e correlacionar características similares. Para o espaçamento de grade, adotou-se o tamanho de 1 GSD, uma vez que os blocos tinham uma resolução espacial com pouca diferença entre si (45 cm e 50 cm). A Figura 5D mostra o ortomosaico gerado a partir das técnicas automáticas de correspondência densa (*dense image matching*) produzidas no LPS.

3.5 Segmentação por Superpixels

Uma vez gerada a ortoimagem, realizou-se uma segmentação com a técnica superpixel, chamada *simple linear iterative clustering* (SLIC), para subdividir o dossel em pequenas regiões, conforme as características locais. Esta técnica possibilita que as bordas possam ser definidas de acordo com a similaridade dos pixels vizinhos. Esta segmentação foi realizada para permitir classificar as regiões segundo a variação da altura, o que permite encontrar as regiões de regeneração, pois áreas mais degradadas têm alturas de árvores menores em relação às áreas onde as árvores maduras ainda estão preservadas. Como se observa na Figura 6A, as áreas degradadas são visíveis e, logo, um procedimento de segmentação pode ser aplicado diretamente na ortoimagem, usando os níveis de cinza dos pixels. O resultado da segmentação na Figura 6B mostra a geração de 1168 superpixels, os quais tiveram seus tamanhos variados devido às características locais.

A segmentação em superpixels somente divide a imagem em pequenas regiões, porém, ainda é necessário associar um atributo a cada superpixel. Neste caso, o valor associado representa a média das alturas das árvores dentro da região do superpixel. As alturas locais foram obtidas a partir do CHM, o qual foi produzido pela subtração entre o MDS fotogramétrico da época e o MDT de referência, que foi obtido por um sistema de varredura a LASER devido à capacidade de penetração em áreas de floresta, atingindo o solo para gerar modelos de terreno. Os CHMs foram gerados tanto para o bloco 1978 quanto para o bloco 2017, e médias de alturas locais foram atribuídas a cada superpixel de ambos os blocos.

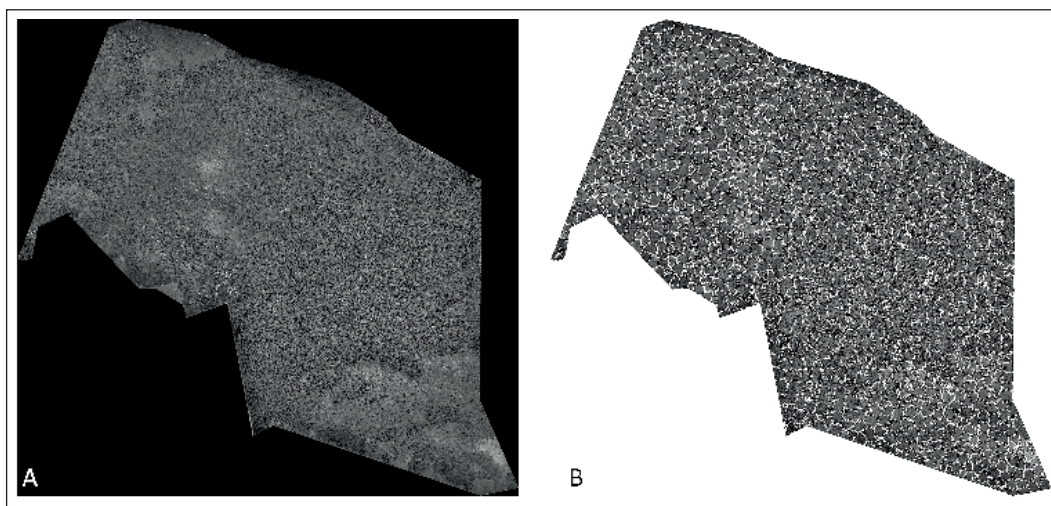


Figura 6 Segmentação por superpixels; A. Ortoimagem em 1978; B. Superpixels gerados (1168 unidades).

3.6 Classificação do Dossel

As formas dos contornos dos superpixels produzidos na ortoimagem de 1978 foram usadas como moldes para o bloco de 2017, o que permitiu uma avaliação da evolução de cada região com base na mesma quantidade de pontos dentro de cada área. Desse modo, a altura do dossel nas regiões pôde ser comparada entre as épocas 1978 e 2017.

Três classes de altura foram determinadas para avaliar a evolução do crescimento vertical do dossel: baixa, média e alta, as quais têm a seguinte relação com a floresta, segundo validações realizadas em campo por Berveglieri *et al.* (2018):

Baixa: representa as áreas em que a maioria das árvores tem altura baixa, devido às ações de desmatamento para extração de madeira. A dominância é de árvores de espécies pioneiras, típicas de áreas de regeneração. Arbustos também aparecem como na cobertura vegetal;

Média: representa as áreas onde o dossel está em nível intermediário entre as áreas de regeneração e as áreas de conservação.

Alta: representa as áreas com a maior parte das árvores no dossel mais alto, estando em idade madura. Isto indica o estado de conservação da floresta.

resta em relação às espécies secundárias (ou clímax), que são as espécies nobres da floresta.

Para realizar a classificação do dossel nos blocos 1978 e 2017, as alturas nos superpixels foram normalizadas para um mesmo intervalo de referência e, então, a definição dos limites das três classes foi baseada em análise de histograma dessas alturas normalizadas. A Figura 7A mostra o resultado da classificação do bloco 1978, e a Figura 7B, do bloco 2017.

4 Resultados e Discussão

A orientação das imagens históricas necessitou de pontos de controle fornecidos por fototriangulação multitemporal. Esses pontos de controle foram determinados por interpretação visual nas imagens aéreas, procurando-se pontos similares entre as épocas. Embora seja uma região de floresta, com grande dificuldade de encontrar pontos, como comentado por Korpela (2006), pontos comuns entre as duas épocas foram localizados em áreas de vias e rochas. Erros nos POIs, como na distância focal, foram absorvidos pelos POE no ajustamento por feixe de raios. As deformações do filme foram tratadas pela transformação geométrica nas marcas fiduciais, e as distorções das lentes, desprezadas. No ajustamento do bloco fotogramétrico de 1978, três pontos

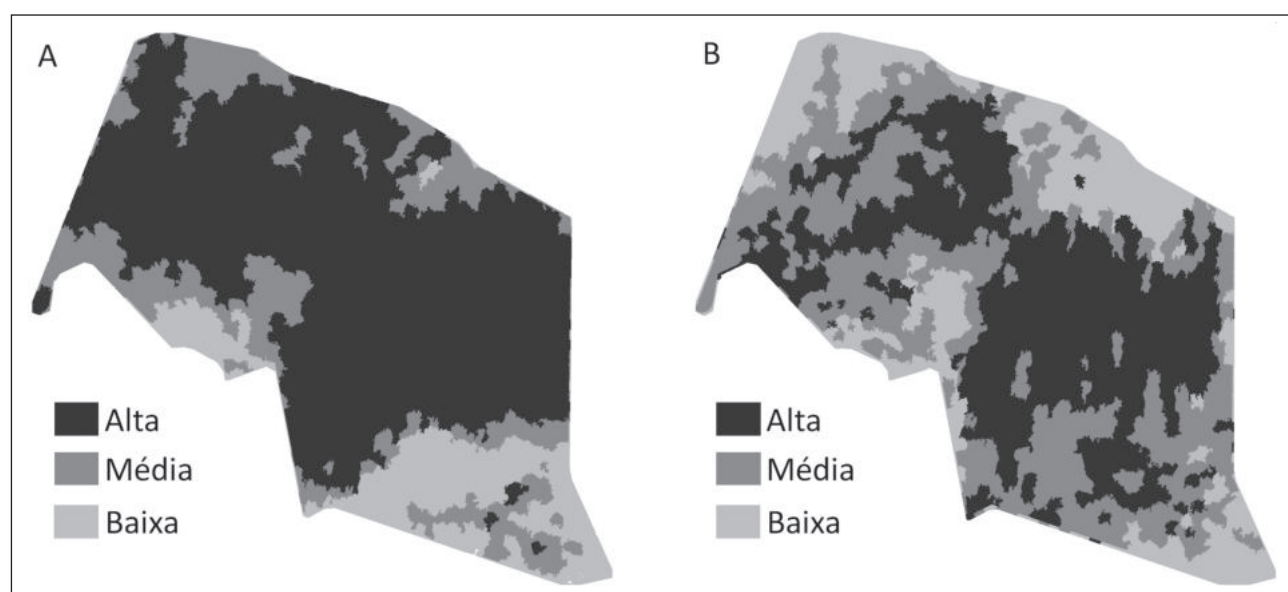


Figura 7 Classificação em três níveis de altura; A. Em 1978; B. Em 2017.

fotogramétricos foram inseridos para uma avaliação como pontos de verificação e resultaram em um REMQ altimétrico de 0,55 m, o que está dentro do intervalo de erro também obtido por Nurminen *et al.* (2015) em seus experimentos com floresta boreal.

A geração do CHM usou como referência de terreno um MDT extraído de um aerolevanteamento por varredura a LASER. Isto foi possível porque a floresta é uma unidade em conservação permanente, onde não houve intervenções ou alterações significativas em relação ao relevo durante o período. Assim, assumiu-se que o terreno permaneceu constante e, portanto, foi usado para o cálculo das alturas absolutas das árvores para os dois blocos. Neste caso, realizou-se a integração entre as nuvens de pontos fotogramétricos e LASER, viabilizando a análise sobre o desenvolvimento do crescimento vertical da floresta, principalmente nas áreas de regeneração.

A Tabela 3 apresenta uma análise baseada em média e desvio-padrão nas três classes de alturas (baixa, média e alta), considerando o bloco de 1978. Os cálculos foram realizados segundo o número de superpixels em cada classe, em que 275 (23,5%) foram referentes à classe baixa, 280 (24,0%) à classe média e 613 (52,5%) à classe alta. Estatisticamente, a classe baixa apresentou uma média de 3,42 m, com alturas variando de 0,44 m a 4,33 m. O pequeno valor do desvio-padrão de 1,73 m, variando entre 0,32 m e 2,35 m, indicou que as árvores baixas foram predominantes e as árvores acima de 14 m foram ocorrências pontuais de pouca frequência, devido ao desmatamento. Na classe média, a altura média foi de 6,43 m com mínimo e máximo maiores que a classe baixa, assim como o desvio-padrão, que também foi maior, evidenciando uma região de transição. Como esperado, os maiores valores foram obtidos na classe alta, a qual apresentou uma média de 10,36 m e altura atribuída aos superpixels variando de 4,71 m a 18,89 m. Por conseguinte, o desvio-padrão também foi maior e com variações maiores em relação às outras classes, o que reflete a dominância das árvores maduras.

Similarmente, fez-se uma análise estatística para a classificação do bloco de 2017, cujos resultados estão na Tabela 4. Neste bloco, a classificação

Classe	N. de Superpixels	Média da Altura (m)			Desvio-Padrão Médio (m)		
		Valor	Mín	Máx	Valor	Mín	Máx
Baixa	275	3,42	0,44	14,33	1,73	0,32	2,35
Média	280	6,43	2,92	18,44	3,21	2,35	4,00
Alta	613	10,36	4,71	18,89	5,49	4,01	7,86

Tabela 3 Média e desvio-padrão das alturas nos superpixels em cada classe do bloco de 1978.

dos superpixels apresentou as seguintes proporções: 32,6% na classe baixa; 36,1% na classe média e 31,3% na classe alta. Observa-se que, após 39 anos, a classe baixa tem apresentado um crescimento da altura média (6,13 m) com variação entre 0,97 m e 10,2 m, e o pequeno desvio-padrão médio indica que as regiões têm pouca variação, sendo aproximadamente homogêneas. A classe média também apresentou um crescimento na média das alturas, atingindo 8,80 m e um desvio-padrão de 2,39 m. No entanto, a classe alta obteve uma altura média de 9,34 m, o que é aproximadamente 1 m menor do que era em 1978. O desvio-padrão nesta classe também resultou em valores menores. Isto é um reflexo da redução das áreas com árvores maduras, que vêm sofrendo impactos ao longo do tempo por causas naturais. Observa-se, ainda, que as classes baixa e média aumentaram sua proporção na floresta em comparação com a classificação de 1978.

Classe	N. de Superpixels	Média da Altura (m)			Desvio-Padrão Médio (m)		
		Valor	Mín	Máx	Valor	Mín	Máx
Baixa	381	6,13	0,97	10,21	1,57	0,52	2,04
Média	422	8,80	2,52	11,56	2,39	2,04	2,69
Alta	365	9,34	2,39	13,47	3,10	2,69	4,72

Tabela 4 Média e desvio-padrão das alturas nos superpixels em cada classe do bloco de 2017.

Os valores mostrados na Tabela 5 foram calculados considerando o status em 2017 dos superpixels definidos em 1978, ou seja, fez-se um cálculo de média e desvio-padrão em 2017 sobre os mesmos grupos definidos na Tabela 3 (275, 280 e 613 superpixels). O propósito foi examinar a evolução nos 39 anos, usando a configuração de 1978. Desse modo, as regiões classificadas como degradadas em 1978 foram analisadas quanto a sua regeneração ao longo do tempo. Nota-se que os 275 superpixels, representando as regiões de acentuado desmatamento

em 1978, tiveram um aumento para 6,84 m na altura média, com desvio-padrão de 2,04 m, o que comprova a regeneração dessas regiões. Os 280 superpixels da classe média em 1978 também demonstraram um aumento na altura média, atingindo 7,60 m com um desvio-padrão de 2,05 m, o que confirma a evolução nas regiões com alturas intermediárias. Por outro lado, os 613 superpixels da classe alta tiveram uma diminuição na altura média para 8,68 m com desvio-padrão de 2,62 m, o que pode ser explicado pela redução das áreas de floresta madura.

Classe	Média da Altura (m)			Desvio-Padrão Médio (m)		
	Valor	Mín	Máx	Valor	Mín	Máx
Baixa	6,84	0,97	12,18	2,04	0,56	3,54
Média	7,60	1,15	12,62	2,05	0,52	3,88
Alta	8,68	2,16	13,47	2,62	0,81	4,72

Tabela 5 Análise de evolução: pelo cálculo de média e desvio-padrão das alturas em 2017, a partir dos superpixels classificados em 1978.

A Figura 8 exibe uma comparação entre os CHMs de 1978 e 2017. Três perfis superpostos foram extraídos para exemplificar o dossel em cada classe: em 8(a), tem-se um perfil da classe alta; em 8(b), perfil da classe intermediária e, em 8(c), perfil da classe baixa, em que o dossel mais baixo de 1978 indica uma área desmatada e, em 2017, mostra-se que a área está em regeneração, devido à elevação do dossel.

De modo geral, a combinação de segmentação por superpixels e modelos de altura foi possível de ser realizada e permitiu medir a alteração do dossel da floresta em um período de 39 anos, analisando-se as transformações com base em regiões. Esta análise por regiões traz o benefício de não requerer um registro entre nuvens de pontos para avaliar as diferenças ao longo do tempo, o que seria necessário se uma abordagem pixel a pixel fosse utilizada. Quan-

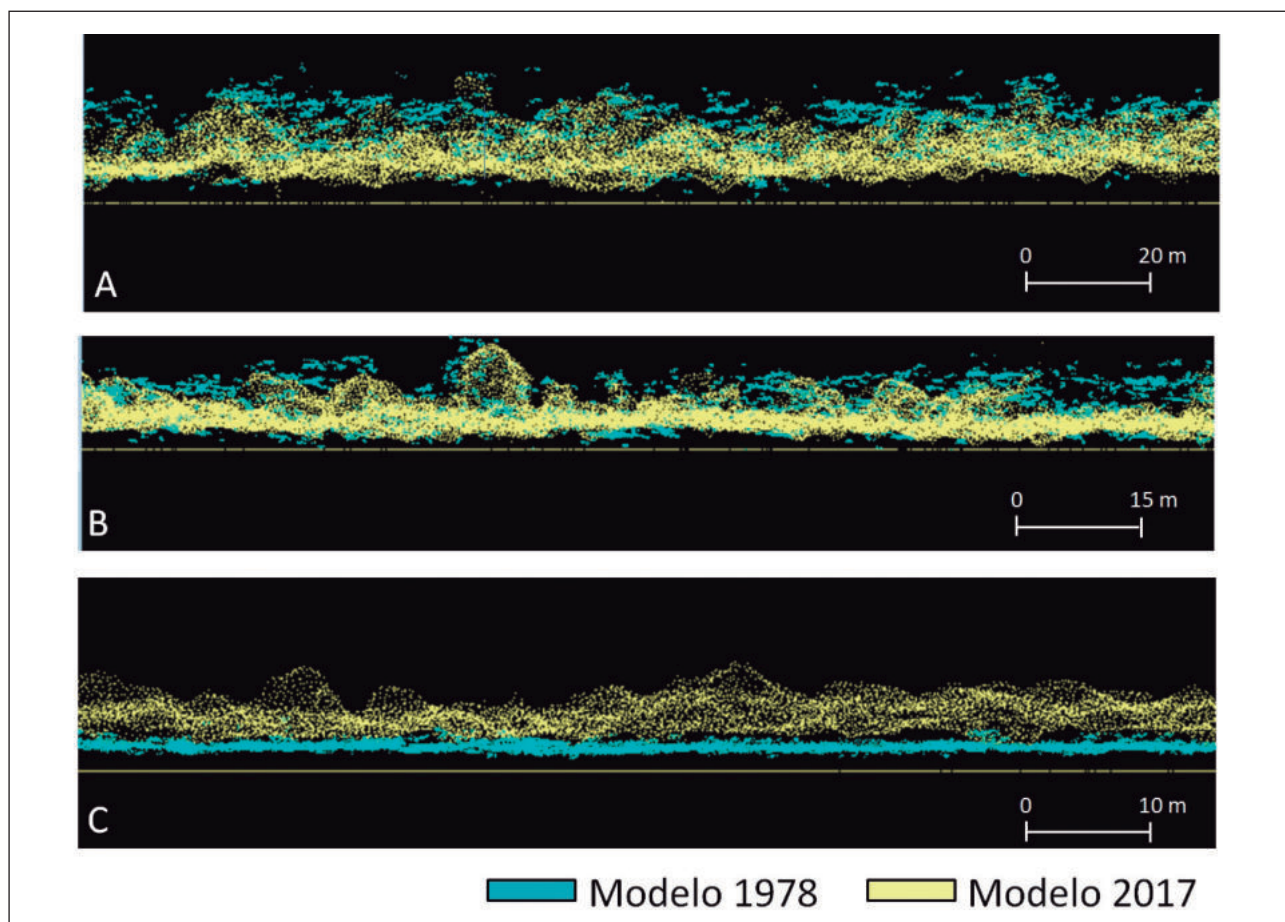


Figura 8 Comparação entre as nuvens fotogramétricas dos blocos de 1978 e 2017; A. Perfil em uma área madura; B. Perfil em uma área intermediária; C. Perfil em uma área de regeneração.

do se trabalha com conjuntos históricos, referências multitemporais acuradas não estão disponíveis para produzir um registro acurado. Logo, a abordagem desenvolvida oferece uma alternativa para se trabalhar com estudos retrospectivos em áreas de florestas tropicais e avaliar a dinâmica das mudanças na cobertura vegetal.

5 Conclusão

Este trabalho demonstrou a possibilidade de reconstrução estrutural de uma área de floresta tropical densa para estudo retrospectivo, usando como fonte de informação imagens analógicas históricas. Uma técnica fotogramétrica para a orientação das imagens históricas foi apresentada e permitiu a geração de um modelo de altura em 3D para as árvores. Uma segmentação baseada em superpixels também foi usada sobre a ortoimagem histórica e permitiu formar pequenas regiões com similaridade de pixels locais. A combinação dos superpixels com o modelo de superfície 3D possibilitou uma análise da altura local, separando-se o dossel da floresta em três classes, para fazer um estudo sobre a variação e regeneração ao longo de 39 anos.

Atualmente as técnicas automáticas com algoritmos de correspondência densa (*dense image matching*) têm tornado possível a reconstrução do dossel florestal a partir de fotografias analógicas. Assim, como demonstrado em florestas boreais, a reconstrução em floresta tropical com vegetação densa também foi possível, estando os erros resultantes dentro dos níveis aceitáveis e comparáveis aos obtidos em florestas boreais, como descritos pela literatura. A integração entre dados LASER e dados fotogramétricos históricos também foi realizada com sucesso nesta abordagem, de tal modo que outras possibilidades de aplicações ainda podem ser desenvolvidas, como medições de copas e de topo de árvores, monitoramento de mortalidade de árvores e estudo de mudanças na cobertura vegetal.

A técnica fotogramétrica apresentada neste trabalho foi aplicada em um contexto de floresta, porém a mesma técnica pode ser utilizada em outros contextos para estudos retrospectivos, como análise de alterações de ambientes, demarcações de limites

de propriedades, expansão urbana etc. No entanto, vale ressaltar que, para viabilizar os estudos retrospectivos, os conjuntos de fotografias aéreas históricas, as quais foram adquiridas em filme, precisam ser digitalizadas com certa urgência, pois com o passar do tempo, os filmes sofrem degradação e perdem a informação. As fotografias aéreas consistem em um valioso registro detalhado que se tem para os estudos em longas séries temporais de décadas passadas.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem às empresas de aerolevantamentos Base Aerofotogrametria e Engemap pela aquisição dos blocos de imagens. Os autores também agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (2013/50426-4 e 2014/05033-7) e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento – (CNPq) (150306/2018-0) pelo apoio financeiro.

7 Referências

- Agisoft LLC, 2019. Disponível em: <<https://www.agisoft.com/>>. Acesso em: 5 set. 2019).
- Berveglieri, A.; Imai, N.N.; Tommaselli, A.M.G.; Casagrande, B. & Honkavaara, E. 2018. Successional Stages and their Evolution in Tropical Forests Using Multi-Temporal Photogrammetric Surface Models and Superpixels. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146: 548–558.
- Berveglieri, A.; Tommaselli, A.M.G.; Imai, N.N.; Ribeiro, E.A.W.; Guimarães, R.B. & Honkavaara, E. 2016. Identification of Successional Stages and Cover Changes of Tropical Forest Based on Digital Surface Model Analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(12): 5385–5397.
- Feurer, D. & Vinatier, F. 2018. Joining Multi-epoch Archival Aerial Images in a Single SfM Block Allows 3-D Change Detection with Almost Exclusively Image Information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146: 495–506.
- Furukawa, Y. & Ponce, J. 2010. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, 32(8): 1362–1376.
- Hexagon Geospatial, 2018. Disponível em: <<https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/imagine-photogrammetry>>. Acesso em: 26 mai. 2019.
- Hirschmüller, H. 2008. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30: 328–341.
- Hyde, P.; Dubayah, R.; Walker, W.; Blair, J.B.; Hofton, M. &

**Geração de Modelo de Altura de Árvore Usando Imagens Aéreas
Históricas para o Monitoramento da Regeneração em Floresta Tropical de Mata Atlântica**
Adilson Berveglieri; Nilton Nobuhiro Imai; Antonio Maria Garcia Tommaselli & Beatriz Fabretti Martinez

- Hunsaker, C. 2006. Mapping Forest Structure for Wildlife Habitat Analysis Using Multi-Sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) Synergy. *Remote Sensing of Environment*, 102(1): 63–73.
- Kadmon, R. & Harari-Kremer, R. 1999. Studying Long-Term Vegetation Dynamics Using Digital Processing of Historical Aerial Photographs. *Remote Sensing of Environment*, 68(2): 164–176.
- Korpela, I., 2006. Geometrically Accurate Time Series of Archived Aerial Images and Airborne Lidar Data in a Forest Environment. *Silva Fennica*, 40(1): 109–126.
- Korpela, I., Tuomola, T., Välimäki, E., 2007. Mapping Forest Plots: an Efficient Method Combining Photogrammetry and Field Triangulation. *Silva Fennica*, 41(3): 457–469.
- Lang, S.; Tiede, D.; Maier, B. & Blaschke, T. 2006. 3D Forest Structure Analysis from Optical and LIDAR Data. *Ambiência*, 2: 95–110.
- Ni, W.; Sun, G.; Ranson, K.J.; Pang, Y.; Zhang, Z. & Yao, W. 2015. Extraction of Ground Surface Elevation From ZY-3 Winter Stereo Imagery Over Deciduous Forested Areas. *Remote Sensing of Environment*, 159: 194–202.
- Nurminen, K.; Litkey, P.; Honkavaara, E.; Vastaranta, M.; Holopainen, M.; Lyytikäinen-Saarenmaa, P.; Kantola, T. & Lyytikäinen, M. 2015. Automation Aspects for the Georeferencing of Photogrammetric Aerial Image Archives in Forested Scenes. *Remote Sensing*, 7(2): 1565–1593.
- Riegl. 2019. Riegl LASER Measurement System. Disponível em: <<http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/23/>>. Acesso em: 10 mai 2019.
- Vastaranta, M.; Niemi, M.; Wulder, M.A.; White, J.C.; Nurminen, K.; Litkey, P.; Honkavaara, E.; Holopainen, M. & Hyyppä, J. 2016. Forest Stand Age Classification Using Time Series of Photogrammetrically Derived Digital Surface Models. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31(2): 194–205.
- Véga, C. & St-Onge, B. 2008. Height Growth Reconstruction of a Boreal Forest Canopy Over a Period of 58 Years Using a Combination of Photogrammetric and Lidar Models. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1784–1794.
- Wallace, L.; Lucieer, A.; Malenovsky, Z.; Turner, D. & Vopěnka, P. 2016. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: a Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*, 7(3): 62–78.