

Monitoramento com UAV em restaurações florestais consorciadas com eucalipto na mata atlântica do Brasil

Monitoring forest restoration intercropped with eucalyptus in the Brazilian atlantic forest with UAV

Milton Marques **FERNANDES**^{1,2}; Camilla Caroline Fontes **NASCIMENTO**¹; André Quintão de **ALMEIDA**¹ & Márcia Rodrigues de Moura **FERNANDES**¹

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a altura e a abertura do dossel de diferentes restaurações florestais consorciadas com eucalipto por meio de aeronave remotamente pilotada (UAV) na mata atlântica brasileira. Foram monitorados três sistemas de restaurações florestais: regeneração natural após corte raso de plantio de eucalipto (RPA), plantio de espécies nativas após corte raso de plantio de eucalipto (RAM) e plantio de espécies nativas após corte de 50% do eucalipto plantado (RAR). Dados de altura e diâmetro foram coletados em dez parcelas de 25 x 25 m em cada área. As imagens multiespectrais RGB foram obtidas pela UAV. A abertura de dossel foi calculada no programa R com pacote forestgapR; a altura, pela métrica *elevation mean* da UAV. A UAV foi eficiente para o monitoramento da altura e da abertura do dossel para restaurações ecológicas ativas (RAM e RAR), porém apresenta limitações para monitorar a altura do dossel na restauração ecológica passiva (RPA), em virtude da presença de muitos indivíduos da regeneração natural que não são contabilizados na coleta de dados de campo, superestimando a altura do dossel obtido pela UAV. Dentre os métodos de restauração florestal avaliados, RAM destacou-se como a abordagem mais eficaz, apresentando um dossel mais fechado e maior altura.

Palavras-chave: mudanças climáticas, fotogrametria, recuperação de áreas degradadas, serviços ambientais.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the height and the canopy openness of different forest restorations intercropped with eucalyptus using a remotely piloted aircraft (UAV) in the Brazilian Atlantic Forest. Three forest restoration systems were monitored: natural regeneration after clear-cutting of eucalyptus plantations (RPA), planting of native species after clear-cutting of eucalyptus plantations (RAM), and planting of native species after cutting 50% of the planted eucalyptus (RAR). Height and diameter data were collected in ten 25 x 25 m plots in each area. RGB multispectral images were obtained by the UAV. Canopy openness was calculated in the R program with the forestgapR package and height by the elevation mean metric of the UAV. The UAV was efficient for monitoring canopy height and openness for active ecological restorations (RAM and RAR). However, it has limitations for monitoring canopy height in passive ecological restoration (RPA), due to the presence of many individuals from natural regeneration that are not counted in the field data collection, overestimating the canopy height obtained by the UAV. Among the forest restoration methods evaluated, RAM stood out as the most effective approach, presenting a more closed canopy and greater height.

Keywords: climate change, environmental services, photogrammetry, recovery of degraded areas.

Recebido em: 10 ago. 2024

Aceito em: 7 fev. 2025

¹ Universidade Federal de Sergipe (UFS), Rua Rosa Elze, Cidade Universitária – CEP 49100-000, São Cristóvão, SE, Brasil.

² Autor para correspondência: miltonmf@gmail.com.

INTRODUÇÃO

A mata atlântica é o bioma brasileiro com maior biodiversidade (MYERS *et al.*, 2000) e o mais degradado, restando apenas 12,4% de sua cobertura original (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2020). O desafio da restauração é grande porque, além de a restauração florestal ser uma atividade muito custosa, cerca de 70% da população brasileira vive nesse bioma (BRANCALION *et al.*, 2021).

Os métodos de restauração podem incluir modelos ativos, passivos ou assistidos (ZANINI *et al.*, 2021). No modelo sucessional ativo, há a introdução de espécies nativas e de tratamentos silviculturais, além de monitoramento para garantir maior biodiversidade (RODRIGUES *et al.*, 2009). Por outro lado, no modelo passivo, o objetivo é exclusivamente a regeneração natural, necessitando-se, apenas em alguns casos, de cercas e proteção florestal, o que o transforma então num modelo assistido (ZAHAWI *et al.*, 2014).

Os métodos tradicionais de monitoramento da restauração ecológica empregam inventários de campo e fotos tiradas no nível do solo para acompanhamento da estrutura e abertura de dossel (VIANI *et al.*, 2013). Eles são caros e demorados, o que dificulta a supervisão da restauração florestal.

Como as aeronaves pilotadas remotamente (UAV) geram uma visão panorâmica de alta resolução e georreferenciada de toda a área de interesse, essa tecnologia tem alto potencial para melhorar os métodos tradicionais de monitoramento de restauração florestal. Diante da necessidade de seguimento da restauração florestal, as UAV vêm se destacando como uma ferramenta para avaliação de vários indicadores, tais como abertura e altura do dossel e biomassa aérea.

Destaca-se que bons resultados estão sendo vistos com dados de 3D das UAV. Assim, no estudo de Cabral *et al.* (2023), ficou demonstrado que a UAV é um método tecnicamente eficaz e economicamente acessível para a estimativa dos atributos florestais, em especial para a classificação do estágio sucessional da vegetação, sendo mais econômico que o LiDAR (*light detection and ranging* – sensor remoto ativo) e o método de inventário tradicional.

As UAVs são adequadas para classificar diferentes abordagens de restauração e monitorar a restauração floresta porque: 1) cobrem grandes áreas em um voo, 2) fornecem alta resolução espacial e 3) fornecem informações sobre indicadores ecológicos importantes, tais como atributos estruturais da vegetação e identificação de espécies. As tecnologias multiespectrais permitem identificar espécies e estimar a biomassa e a produtividade primária (ALMEIDA *et al.*, 2021). Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, com o uso de UAV, a altura e a abertura do dossel de diferentes restaurações ecológicas consorciadas com eucalipto na mata atlântica brasileira.

MATERIAL E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na Fazenda Rio Fundo (11° 06' 35" S e 37° 20' 11" W), município de Itaporanga d'Ajuda, localizado no estado de Sergipe, Brasil (figura 1).

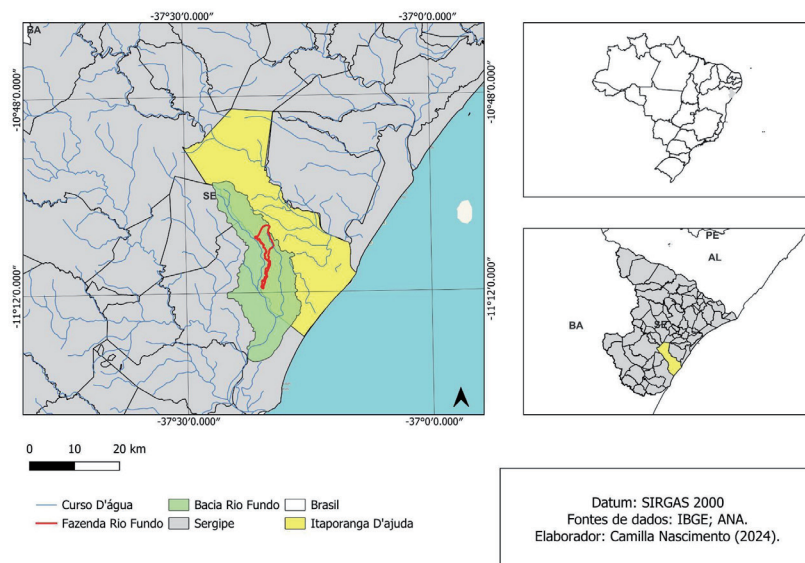


Figura 1 – Localização da área de estudo. Fonte: primária.

O clima na área de estudo é do tipo A, com estação seca no verão e estação chuvosa no inverno, temperaturas oscilando entre 23°C e 31°C, precipitação média de 1.600 mm, sendo o local inserido na floresta estacional semidecidual, no bioma mata atlântica, e o solo foi classificado como Plintossolo Háplico (WHITE & SILVA, 2018). O principal uso da terra na região é a agricultura e a silvicultura de eucalipto.

Em 2013, após a supressão da vegetação de mata atlântica na fazenda com o objetivo de plantio de *Eucalyptus urophylla*, essa área foi autuada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), pois não tinha licença para supressão de vegetação. Foi elaborado um Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), conforme exigência do Ibama; portanto, implementaram-se projetos de restauração florestal com diferentes metodologias.

TRATAMENTOS

A Fazenda Rio Fundo possui 1.563,44 ha e pertence a uma empresa industrial de papel e celulose do município de Itaporanga d'Ajuda (SE). A principal atividade da fazenda é o plantio de *E. urophylla* para produção de lenha.

Em 2012, a fazenda possuía passivo ambiental, necessitando de restauração para atendimento à legislação ambiental vigente em decorrência de desmatamento de áreas de APP. Em 2013, os gestores agrícolas implementaram 38,63 ha de restauração florestal. Dessa forma, realizou-se um conjunto de restaurações florestais ativas e passivas. Três áreas de restauração florestal foram implantadas em 2013, quando as plantações de eucalipto completavam 7 anos. Essas plantações de eucalipto não tiveram nenhum corte ou rotação até 2013.

Na primeira área de restauração florestal, todos os eucaliptos foram cortados com motosserra e as toras retiradas manualmente, deixando a área totalmente desmatada. No mesmo mês, foram plantadas espécies arbóreas nativas, com espaçamento 4 x 4 m. Tal tratamento foi denominado Restauração Ativa (RAM) e consiste no plantio de espécies nativas após o corte raso do plantio de eucalipto. Foram plantadas as seguintes espécies: *Aegiphila klotzchiana*, *Anadenanthera colubrina*, *Apeiba tibourbou*, *Byrsonima sericea*, *Cecropia pachystachya*, *Centrolorobium robustum*, *Cupania oblongifolia*, *Cupania vernalis*, *Curatella americana*, *Didymopanax morototonii*, *Eriotheca pubescens*, *Eritroxylum deciduum*, *Erythrina velutina*, *Eschweilera ovata*, *Guapira opposita*, *Guazuma ulmifolia*, *Himatanthus bracteatus*, *Inga laurina*, *Inga marginata*, *Inga vera*, *Miconia cinnamomifolia*, *Mimosa caesalpinifolia*, *Myrcia selloi*, *Pterodum emarginatus*, *Samanea tubulosa*, *Sapindus saponária*, *Strypnodendron pulcherrinum*, *Swartzia apetala*, *Tapirira guianensis*, *Tibouchina granulosa* e *Vismia brasiliensis*.

Na segunda área de restauração florestal (RAR), 50% dos indivíduos de eucalipto foram desbastados com motosserra e as toras foram retiradas manualmente. Posteriormente, nos locais de eucaliptos removidos, plantaram-se espécies arbóreas nativas (no espaçamento 4 x 4 m), sendo as espécies as mesmas que haviam sido plantadas na RAM. Essa área recebeu a sigla RAR por se caracterizar pelo plantio de espécies nativas após o corte de 50% dos indivíduos de eucalipto.

Na terceira área de restauração florestal, o eucalipto foi derrubado com motosserra e as toras foram retiradas manualmente. Porém não houve plantio de árvores nativas e a área foi cercada para estimular a regeneração natural. Em virtude da técnica utilizada, a área foi classificada como Restauração Passiva (RPA). Destaca-se que todas as atividades (corte de eucalipto e plantio de espécies nativas e desbastes) ligadas às restaurações de RAM, RPA e RAR foram feitas entre março e junho de 2013.

INVENTÁRIO FLORESTAL

Em 2022, foram demarcadas dez parcelas quadradas (25 x 25 m), equidistantes 50 m entre si em cada tratamento, utilizando amostragem sistemática com parcelas de área fixa. Em cada parcela, a circunferência à altura do peito (CAP) de todas as árvores foi medida a 1,30 m do solo e, posteriormente, transformada em diâmetro à altura do peito (DAP).

Os quatro vértices das parcelas da Fazenda Rio Fundo foram georreferenciados (UTM-24S, SIRGAS 2000) com um receptor GNSS Trimble RTK R6 (www.trimble.com), resultando em um erro horizontal médio (X e Y) de 0,02 m. O tempo de coleta das coordenadas de cada vértice no modo diferencial foi de cinco minutos.

Mediu-se a CAP com fita métrica. Nas parcelas, foram medidos todos os indivíduos acima de 5 cm de CAP e os valores transformados em DAP. Coletaram-se os valores de altura total (H) das árvores com uma vara graduada (telescópica) de 10 m. Árvores maiores que 10 m foram medidas com um clinômetro digital.

Para identificar as espécies, fizeram-se coletas botânicas que, posteriormente, foram identificadas por meio da literatura botânica, além de ter havido auxílio de um parobotânico. As espécies não identificadas em campo foram coletadas e identificadas por comparação no herbário da Universidade Federal de Sergipe. A nomenclatura botânica foi baseada na APG IV (APG IV, 2016).

AQUISIÇÃO DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS

As fotografias aéreas de alta resolução espacial (0,04 m) foram adquiridas, para todas as áreas de estudo, por um sensor CMOS 1" (20 megapixels) acoplado a uma plataforma multirrotor DJI Phantom 4 PRO (SZ DJI Technology Co., Ltd., Shenzhen, China). As imagens multispectrais RGB foram coletadas durante o inventário florestal, em boas condições climáticas, com tempo ensolarado e velocidade do vento inferior a 10 m s⁻¹.

A altitude do voo foi definida para 120 metros acima do nível do solo e sobreposição frontal de 75% e lateral de 70%. Realizou-se um voo por área de estudo no dia 14 de junho de 2022 na Fazenda Rio Fundo. Ao todo, foram registradas 170 imagens (no formato .jpg) para a área.

PROCESSAMENTO FOTOGRAFAMÉTRICO

O processamento das imagens foi feito considerando o total de fotos registradas na área de estudo. As imagens adquiridas pela câmera a bordo da UAV foram processadas no software Agisoft Metashape Professional Edition 1.1.0, conforme descrito em Almeida *et al.* (2020). Esse software de fotogrametria utiliza um conjunto de algoritmos de visão computacional *Structure from Motion* (SfM) e algoritmos de correspondência estéreo fotogramétrica para reconstrução 3D de imagens sobrepostas (IGLHAUT *et al.*, 2019).

Durante o processo de alinhamento das fotos, utilizaram-se 20 pontos de controle do terreno e 10 pontos de checagem para a área da fazenda. Os pontos foram materializados em campo com o auxílio de "gabaritos" de plástico na cor vermelha, com 0,40 m de diâmetro. Os pontos foram

distribuídos aleatoriamente no interior da área de estudo, considerando os dois polígonos de voo planejados previamente. Todos os pontos foram coletados com o receptor GNSS Trimble RTK R6 (www.trimble.com), resultando em um erro horizontal médio (X e Y) de 0,01 m.

Vale destacar que todos os pontos foram materializados em áreas desprovidas de vegetação (estradas, aceiros e solos agrícolas em preparo), permitindo, assim, a sua visualização durante o processo de alinhamento. No fim do processamento, os valores do desvio médio quadrado (RMSE) dos pontos de checagem foram de 0,04 (horizontal) e 0,11 (vertical).

O alinhamento da imagem ocorreu com acurácia alta (*accuracy high*), com seleção de par de referência, o número de pontos principais (*key points*) igual a 40.000,00 e número de pontos de amarração (*tie points*) igual a 4.000,00. Para a construção de nuvens densa de pontos, foram definidos qualidade média (*quality medium*) e modo de filtragem suave (*filtering mode mild*).

Os Modelos Digitais do Terreno (MDTs) foram criados a partir da nuvem de pontos 3D, aplicando o algoritmo Adaptive Triangulated Irregular Network (TIN), desenvolvido por Axelsson (1999), implementado no Agisoft Metashape. Nessa etapa, os pontos representativos do terreno da nuvem de pontos 3D são classificados e, posteriormente, interpolados. Ao fim do processo, a nuvem de pontos 3D fotogrametria aérea digital (FAD) foi exportada no formato de arquivo (".las") e o MDT no formato raster (".tif") com resolução espacial de 0,50 m. O mesmo procedimento para obter o MDT foi realizado para gerar os Modelos Digitais de Superfície (MDS).

MÉTRICAS FAD-UAV DERIVADAS DA NUVEM DE PONTOS

Métricas tradicionais de altura e métricas que representam a cobertura do dossel foram estimadas a partir da nuvem de pontos normalizada 3D UAV para descrever a estrutura de cada parcela. O valor de corte de altura de 1,5 m foi usado como limite para separar os pontos que representam o solo e a vegetação do sub-bosque daqueles associados às árvores de interesse com diâmetro a 1,30 de altura do solo (DAP) \geq 5 cm. Todas as métricas foram extraídas do *software* Fusion/LDV 4.40.

AVALIAÇÃO DA FOTOGRAMETRIA AÉREA DIGITAL

A acurácia dos MDTs gerados foi avaliada de duas formas. Primeiro, pela comparação direta dos valores de elevação extraídos dos MDTs obtidos pela UAV com os valores de elevação estimados em campo com receptor GNSS Trimble RTK R6 (www.trimble.com). Nessa etapa, empregaram-se os valores de elevação de alguns vértices de cada uma das parcelas de inventário, totalizando 50 pontos na área.

Em segundo lugar, foram comparados os valores de altura média das árvores de cada parcela com os valores da métrica *elevation mean* extraídos das nuvens de pontos 3D UAV normalizadas para cada parcela. Após recorte das nuvens de pontos para cada parcela de inventário, elas foram normalizadas com a subtração do MDT, ou seja, os valores de elevação foram transformados em altura. A altura média foi estimada pela média das alturas de cada parcela.

As comparações foram realizadas por meio de regressão linear simples (DANDOIS & ELLIS, 2013) e calculando o RMSE, o erro sistemático (viés) e o desvio padrão. Toda a análise foi feita na linguagem de programação R (R Core Team, 2023).

QUANTIFICAÇÃO DA ABERTURA DE DOSSSEL

Considera-se clareira uma abertura na copa, definida pela projeção vertical da copa das árvores limítrofes, atingindo o solo através de todos os estratos até 2 m de altura da vegetação e um mínimo de 2 m² de área. Adotou-se uma área mínima de 2 m² para clareira, uma vez que estudos recomendam entre 1 m² e 5 m² para mapeamento de clareiras em florestas tropicais (NIESCHULZE *et al.*, 2012; BOYD *et al.*, 2013).

A medição da diferença vertical entre MDT e MDS (ou seja, Canopy Height Model – CHM) serviu, então, para avaliar a altura do dossel florestal acima do solo, cobrindo toda a área de estudo

com 4 cm de resolução espacial. Recorreu-se ao pacote R ForestGapR (SILVA *et al.*, 2019) para detectar lacunas no dossel em todo o CHM, o que permitiu localizar áreas contíguas consistentes com a definição de clareira aqui utilizada.

AVALIAÇÃO DE PRECISÃO E VALIDAÇÃO DE DADOS DA ABERTURA DE DOSSEL

Os dados de validação de clareiras foram derivados de levantamentos de campo (coordenadas geográficas das clareiras nas 30 parcelas) e da interpretação visual dos resultados de altíssima resolução obtidos pela UAV. Primeiro, inseriram-se 100 pontos aleatoriamente nas 30 parcelas de 25 m × 25 m (625 m²) nas áreas de estudo. Dentro de cada parcela, todas as clareiras visualmente detectáveis foram digitalizadas manualmente como polígonos vetoriais, representando os limites das clareiras de referência, utilizando o ortomosaico e o CHM como camadas de base.

A precisão da detecção de clareiras foi determinada por meio de avaliação baseada em objetos (SOLANO *et al.*, 2022), comparando o número total de clareiras verdadeiras identificadas no CHM com os dados de validação. A aquisição de dados de validação e a avaliação de precisão foram realizadas utilizando QGIS (versão 3.16 LTR) (QGIS.org, 2022).

Esse processo foi feito por meio de uma amostra independente para recordação (*r*) e precisão (*p*), ambas utilizadas para calcular o escore F (SOKOLOVA *et al.*, 2006; MODICA *et al.*, 2021) para a acurácia geral (equação 1):

$$F=(r \times p)/(r+p) \quad (1)$$

Em que:

$$r=TP/(T+FN) \quad (2)$$

$$p=TP/(TP+FP) \quad (3)$$

O erro de omissão está relacionado a *r* (equação 2), enquanto o erro de comissão está relacionado a *p* (equação 3). Esses indicadores de desempenho consideram clareiras detectadas corretamente (verdadeiros positivos – TP), clareiras detectadas erroneamente (falsos positivos – FP) e clareiras não detectadas (falsos negativos – FN). A razão entre o TP e o número total de clareiras serviu como indicador da taxa de detecção de clareiras. A aquisição de dados de validação e a avaliação de precisão foram realizadas usando QGIS (versão 3.16 LTR) (QGIS.org, 2022).

Também foi calculado o índice Kappa entre as clareiras derivadas do CHM e as clareiras delimitadas manualmente. O índice Kappa, também conhecido como Coeficiente Kappa, é uma métrica estatística amplamente usada na classificação de imagens, especialmente em contextos de sensoriamento remoto e análise geoespacial. Essa métrica avalia a concordância entre duas ou mais classificações, levando em consideração a possibilidade de concordância ao acaso.

Após a análise das lacunas derivadas do CHM, estas foram extraídas e convertidas em polígonos vetoriais, antes do cálculo estatístico, para determinar as propriedades estruturais: área da lacuna e altura máxima, mínima e média do dossel. A análise estatística foi feita por meio do pacote R ForestGapR (SILVA *et al.*, 2019).

RESULTADOS

Observa-se que, de forma geral, a altura média mensurada pela UAV foi inferior àquela medida em campo. A maior amplitude de altura entre a UAV e o campo foi em RPA (tabela 1).

Tabela 1 – Dados da altura média obtidos por UAV e no campo.

| Tratamentos | Altura média UAV (m) | Altura média campo (m) |
|-------------|----------------------|------------------------|
| RAM | 3,78 | 5,78 |
| RAR | 2,93 | 7,14 |
| RPA | 2,07 | 6,85 |
| Média | 1,98 | 6,59 |

Os resultados da validação da altura calculada pela UAV apresentam um r^2 baixo de 0,40 e um RMSE de 1,22 m. Em relação a RAM, o r^2 é de 0,66 e um RMSE de 0,47 m. Em RAR, obteve-se um alto r^2 de 0,82 e um RMSE de 0,67 m. Em RPA, houve um baixo r^2 de 0,09 e um RMSE de 1,33 m.

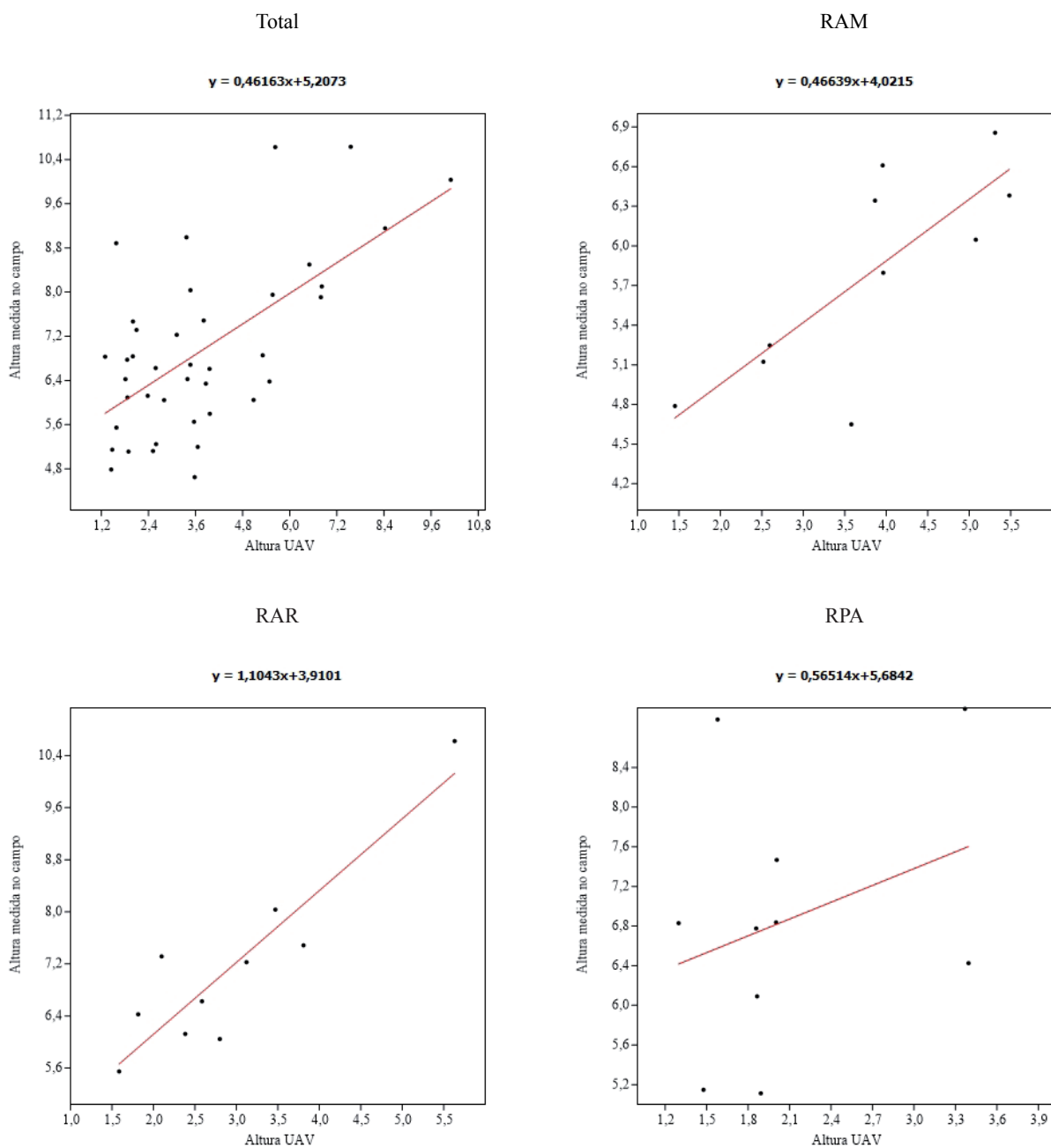


Figura 2 – Regressão linear com os dados de altura obtidos pela UAV e medidos em campo. Fonte: primária.

A RAM apresenta uma abertura de dossel pela UAV de 39,43% e de 38,32% manualmente. Em RAR, obteve-se a abertura de dossel com a UAV de 43,86 e de 27,48% manualmente. A RPA obteve a maior abertura de dossel estimada pela UAV (70,99%); manualmente o valor chegou a 91,22% (tabela 2).

Tabela 2 – Dados de abertura do dossel obtidos por UAV e manualmente.

| Tratamentos | Abertura do dossel (UAV) (%) | Abertura do dossel (manual) (%) |
|-------------|---------------------------------|------------------------------------|
| RAM | 39,43 | 38,32 |
| RAR | 43,86 | 27,48 |
| RPA | 70,99 | 91,22 |

Avaliou-se a precisão da classificação pelo ForestGap, para distinguir as áreas com abertura de dossel das áreas com dossel fechado e com as imagens da UAV, a fim de comparar com a classificação manual realizada no software Qgis. O intérprete detectou 94 clareiras distribuídas aleatoriamente em toda a área de estudo após a inspeção. Das 94 clareiras, 86 foram extraídas corretamente e oito não foram detectadas. Não houve clareiras falsamente detectadas. A métrica de desempenho de *recall* (*r*) foi de 0,87 e o valor de precisão (*p*), 0.90. O F-score (0,88) determinou a precisão geral, alcançando assim um valor geral de taxa de detecção de *gap* de 88%. O valor do Índice Kappa foi de 0.8.

DISCUSSÃO

A avaliação da métrica *elevation mean* indicou que tal métrica não representou bem a altura das restaurações florestais, considerando-se todas as parcelas. Sabe-se, no entanto, que isso é influenciado pela restauração florestal RPA com baixa densidade de vegetação, que apresenta um r^2 de 0,09 e um RMSE de 1,33 m (64,25%).

Em um estudo com UAV para avaliação da altura do dossel (ROȘCA *et al.*, 2018), observou-se que a altura das árvores é fortemente afetada pela abertura de dossel. Isso ocorre porque, em superfícies côncavas, os pontos refletem a luz entre si e a forma não pode ser recriada com precisão pela restituição estéreo (NAYAR *et al.*, 1991; ROȘCA *et al.*, 2018). O fato de a abertura do dossel não ser modelada com precisão a partir das nuvens de pontos derivadas da UAV torna essa tecnologia menos adequada para a modelagem da altura das árvores em regeneração natural muito aberta (ROȘCA *et al.*, 2018).

Notou-se uma subestimativa da altura derivada dos dados da UAV, assumindo-se que os dados de campo fornecem medições precisas da altura das árvores. Outros estudos em restaurações em florestas tropicais observaram tal subestimativa (SWINFIELD *et al.*, 2019) utilizando fotografias áreas de UAV para mensurar a altura do dossel, tal como em Hutan Harapan, na Indonésia, que teve uma subestimativa de 39% na altura em comparação aos dados de campo.

Em RAM, observa-se um RMSE de 0,52 m, o que explica 60% da variação dos valores de altura média em campo; em RAR observa-se um RMSE de 0,64 m, o que explica os 82%. O presente estudo demonstra que a métrica *elevation mean* pode ser utilizada para estimar a altura das árvores em restaurações florestais com maior densidade de vegetação. No entanto Almeida *et al.* (2020), avaliando uma floresta secundária na mesma região e tipologia vegetal, encontraram elevada concordância entre os valores de altura das árvores medidos em campo e os estimados por UAV (RMSE = 1 m ou 4%, $r^2 = 0,98$), comprovando o alto desempenho do modelo digital do terreno gerado por UAV para representar áreas com baixa densidade de vegetação.

Em RPA, obteve-se um r^2 muito baixo e o maior RMSE entre as restaurações florestais. Isso pode estar ocorrendo em decorrência do critério de inclusão de indivíduos arbóreos, em que são consideradas todas as árvores com DAP maior ou igual a 5 cm. Por ser RPA um modelo de restauração

florestal que depende da capacidade da regeneração natural, esse processo pode ser mais lento que a restauração florestal ativa por meio de plantio de árvores.

Em RPA, existem muitos indivíduos arbóreos na regeneração natural com DAP menor que 5 cm que são mensurados pela métrica *elevation mean* do UAV. Todavia o levantamento da altura em campo selecionou os indivíduos arbóreos com maior altura, excluindo muitos indivíduos de menor porte, que não tinham um DAP maior que 5 cm.

Após dez anos de implantação de diferentes modelos sucessionais de restauração florestal, o plantio de espécies nativas (RAM) foi mais eficiente no fechamento do dossel. Apesar de RAR ter mantido 50% dos indivíduos de eucalipto plantados em 2006, o que poderia proporcionar um dossel mais fechado, isso não foi observado.

O protocolo de monitoramento dos projetos de restauração florestal na mata atlântica brasileira define que as restaurações florestais devem ter duas fases. Na primeira fase, a maior parte do dinheiro gasto em projetos de restauração da mata atlântica, e possivelmente na maioria das iniciativas de restauração florestal, tem como objetivo o estabelecimento de uma cobertura de dossel, por isso é importante avaliar desde o início o sucesso em direção a esse objetivo e tomar ações corretivas se necessário. Na segunda fase, a avaliação de outros indicadores ecológicos (acumulação de biomassa, regeneração natural de arbustos e árvores) é mais apropriada uma vez estabelecida uma cobertura inicial do dossel (VIANI *et al.*, 2017).

A fase I concentra-se no desenvolvimento bem-sucedido da cobertura arbórea e, com base na experiência de pesquisadores e profissionais de restauração florestal da mata atlântica no Brasil, definiu-se que 70% é o nível mínimo de cobertura da copa necessário para reduzir a cobertura de gramíneas invasoras e facilitar o estabelecimento de árvores (VIANI *et al.*, 2017). Nas três restaurações florestais, em nenhuma foi observada uma cobertura de dossel superior a 70%. A restauração florestal com maior recobrimento do solo pelo dossel foi RAM.

As restaurações florestais na mata atlântica brasileira têm atingido uma cobertura do dossel similar à de florestas secundárias de referência a partir de 3 anos e a altura, no mínimo, 10 anos. Tal fato indica que ambos os indicadores têm sido os mais utilizados para monitorar áreas em restauração, além de serem de fácil e rápida mensuração em campo (LONDE *et al.*, 2020).

A RPA utilizou um modelo de restauração florestal baseado na regeneração natural proporcionada pelo banco de sementes do solo, banco de plântulas e propágulos de sementes de fragmentos florestais adjacentes. Não foi capaz de proporcionar o desenvolvimento de espécies florestais suficiente para formar um dossel, já que apresenta mais de 70% do dossel aberto.

Porém o presente trabalho lidou com algumas limitações, como a diferença entre clareiras mapeadas manualmente na imagem RGB e as clareiras definidas pela nuvem de pontos da UAV. Isso ocorre porque a fotogrametria da UAV se limita a reconstruir superfícies visíveis e utiliza uma altura mínima de 2 m e uma área mínima de 2 m². A delimitação das clareiras na imagem RGB considera visualmente se a área está coberta de vegetação, sem incorporar a altura mínima de 2 m utilizada na delimitação de clareiras pelo UAV.

O mapeamento das clareiras gerou resultados promissores, com uma taxa de detecção de 88%. Entretanto o erro de omissão deve-se provavelmente ao mapeamento de clareiras pela imagem RGB de vegetação. O F score varia de 0 a 1 e tem sido amplamente empregado em estudos com UAV para monitoramento de restaurações florestais (ALBUQUERQUE *et al.*, 2021). Portanto, um F score de 0,88 mostra que o mapeamento de clareiras por UAV apresentou uma alta precisão.

A possibilidade de identificar trechos com diferentes sucessos de restauração florestal via fotointerpretação do ortomosaico da UAV de baixo custo é outra vantagem do monitoramento de restaurações florestais utilizando imagens de alta resolução espacial. Fornece informações valiosas em condições de dossel aberto, mesmo que não haja mais dados do local de restauração florestal, tais como parcelas de campo disponíveis (ALBUQUERQUE *et al.*, 2021).

Como a fotointerpretação do ortomosaico UAV de baixo custo gera dados de referência para abertura de dossel, densidade arbórea e infestação de gramíneas, que são parâmetros estruturais relevantes, os gestores conseguem verificar, por meio apenas de dados da UAV, trechos com menor sucesso de restauração florestal que podem necessitar de alguma intervenção.

A altura da árvore é o único parâmetro estrutural de restauração florestal que exige um trabalho de campo tradicional para dados de referência. Trabalhos de campo tradicionais são necessários para avaliar a modelagem computacional 3D da UAV, porque não é possível verificar a altura das árvores utilizando uma fotointerpretação do CHM (ALBUQUERQUE *et al.*, 2021).

CONCLUSÃO

A UAV foi eficiente para o monitoramento da altura e da abertura do dossel para restaurações florestais ativas (RAM e RAR). Porém apresenta limitações para monitorar a altura do dossel na restauração florestal passiva (RPA), por causa da presença de muitos indivíduos da regeneração natural que não são contabilizados na coleta de dados de campo, superestimando a altura do dossel obtido por UAV.

A utilização de um DAP de inclusão de 5 cm para espécies arbóreas mensuradas no campo exclui muitos indivíduos da regeneração natural, levando a uma superestimativa da altura do dossel medida no campo.

Dentre os métodos de restauração florestal avaliados, RAM destacou-se como a abordagem mais eficaz, apresentando um dossel mais fechado e maior altura. Portanto, recomenda-se a adoção da restauração ativa com o plantio de espécies nativas da mata atlântica, especialmente considerando a superioridade demonstrada por RAM nesse contexto.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, R. W., Ferreira, M. E., Olsen, S. I., Tymus, J. R. C., Balieiro, C. P., Mansur, H., Moura, C. J. R., Costa, J. V. S., Branco, M. R. C. & Grohmann, C. H. Forest restoration monitoring protocol with a low-cost remotely piloted aircraft: lessons learned from a case study in the Brazilian atlantic forest. *Remote Sensing*. 2021; 13(1): 1-23.
- Almeida, A., Gonçalves, F., Silva, G., Souza, R., Treuhaft, R., Santos, W., Loureiro, D. & Fernandes, M. Estimating structure and biomass of a secondary Atlantic forest in Brazil using Fourier transforms of vertical profiles derived from UAV photogrammetry point clouds. *Remote Sensing*. 2020; 12(1): 1-25.
- Almeida, D. R. A., Broadbent, E. N., Ferreira, M. P., Meli, P., Zambrano, A. M. A., Gorgens, E. B., Resende, A. F., Almeida, C. T., Amaral, C. H., Corte, A. P. D., Silva, C. A., Romanelli, J. P., Prata, G. A., Almeida, P. D., Stark, S. C., Valbuena, R., Nelson, B. W., Guillemot, J., Féret, J. B., Chazdon, R. & Brancalion, P. H. S. Monitoring restored tropical forest diversity and structure through UAV-borne hyperspectral and lidar fusion. *Remote Sensing Environment*. 2021; 264(1): 1-40.
- Angiosperm Phylogeny Group. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*. 2016; 181(1): 1-20.
- Axelsson, P. Processing of laser scanner data – algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1999; 54(1): 138-147.
- Boyd, D. S., Hill, R. A., Hopkinson, C. & Baker, T. R. Landscape-scale forest disturbance regimes in southern Peruvian Amazonia. *Ecological Applications*. 2013; 23(1): 1588-1602.
- Brancalion, P. H. S., Guillemot, J., César, R. G., Andrade, H. S., Mendes, A., Sorrini, T. B., Piccolo, M. D. C., Peluci, M. C., Moreno, V. D. S., Colletta, G. & Chazdon, R. I. The cost of restoring carbon stocks in Brazil's atlantic forest. *Land Degradation Development*. 2021; 32(1): 830-841.
- Cabral, R. P., Silva, G. F., Almeida, A. Q., Bonilla-Bedoya, S., Dias, H. M., Mendonça, A. R., Rodrigues, N. M. M., Valente, C. C. A., Oliveira, K., Gonçalves, F. G. & Sarcinelli, T. S. Mapping of the successional stage of a secondary forest using point clouds derived from UAV photogrammetry. *Remote Sensing*. 2023; 15(1): 1-29.
- Dandois, J. P. & Ellis, E. C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing Environment*. 2013; 136(1): 259-276.

- Fundação SOS Mata Atlântica & Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Inpe. Atlas dos remanescentes florestais da mata atlântica período 2018-2019. São Paulo: Inpe; 2020. 61 p.
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O’connor, J. & Rosette, J. Structure from motion photogrammetry in forestry: a review. *Current Forestry Reports*. 2019; 5(1): 155-168.
- Londe, V., Farah, F. T., Rodrigues, R. R. & Martins, F. R. Reference and comparison values for ecological indicators in assessing restoration areas in the Atlantic Forest. *Ecological Indicators*. 2020; 110(1): 1-20.
- Modica, G., Luca, G., Messina, G. & Praticò, S. Comparison and assessment of different object-based classifications using machine learning algorithms and UAVs multispectral imagery: a case study in a citrus orchard and an onion crop. *European Journal of Remote Sensing*. 2021; 54(1): 431-460.
- Myers, N., Mittermeyer, R. A., Mittermeyer, C. G., Fonseca, G. A. B. & Kent, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*. 2000; 403(1): 853-858.
- Nayar, S. K., Ikeuchi, K. & Kanade, T. Shape from interreflections. *International Journal of Computer Vision*. 1991; 6(1): 173-195.
- Nieschulze, J., Zimmermann, R., Börner, A. & Schulze, E. D. An assessment of forest canopy structure by LiDAR: Derivation and stability of canopy structure parameters across forest management types. *Forstarchiv*. 2012. 83(1): 195-209.
- QGIS.org. QGIS Desktop 3.16 User Guide. 2022.
- R Core Team. An introduction to R. Practical graph mining with R. London: Taylor & Francis; 2023. 26 p.
- Rodrigues, R. R., Lima, R. A. F., Gandolfi, S. & Nave, A. G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian atlantic forest. *Biological Conservation*. 2009; 142(1): 1242-1251.
- Roşca, S., Suomalainen, J., Bartholomeus, H. & Herold, M. Comparing terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle structure from motion to assess top of canopy structure in tropical forests. *Interface Focus*. 2018; 8(1): 1-11.
- Silva, C. A., Valbuena, R., Pinagé, E. R., Mohan, M., Almeida, D. R. A., North Broadbent, E., Jaafar, W. S. W. M., Almeida, P. D., Cardil, A. & Klauber, C. ForestGapR: An r Package for forest gap analysis from canopy height models. *Methods in Ecology and Evolution*. 2019; 10(1): 1347-1356.
- Sokolova, M., Japkowicz, N. & Szpakowicz, S. Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation. In: *Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence*. Sidney: Springer; 2006. p. 24-29.
- Solano, F., Modica, G., Praticò, S., Box, O. F. & Piovesan, G. Unveiling the complex canopy spatial structure of a Mediterranean old-growth beech (*Fagus sylvatica* L.) forest from UAV observations. *Ecological Indicators*. 2022; 138(1): 1-12.
- Swinfield, T., Lindsell, J. A., Williams, J. V., Harrison, R. D., Agustiono, H., Gemita, E. & Coomes, C. B. S. Mangrove phenology and environmental drivers derived from remote sensing in Southern Thailand. *Remote Sensing*. 2019; 11(1): 1-25.
- Viani, R. A. G., Holl, K. D., Padovezi, A., Strassburg, B. B. N., Farah, F. T., Garcia, L. C., Chaves, R. B., Rodrigues, R. R. & Brancalion, P. H. S. Protocol for monitoring tropical forest restoration: Perspectives from the atlantic forest restoration pact in Brazil. *Tropical Conservation Science*. 2017; 10(1): 1-8.
- Viani, R., Rodrigues, R., Padovezi, A., Farah, F. T., Garcia, L., Sanglade, L., Brancalion, P., Chaves, R., Barreto, T., Strassburg, B. & Scaramuzza, C. D. M. Pacto pela restauração da mata atlântica – protocolo de monitoramento para programas e projetos de restauração florestal. 2013. 61 p. Available at: www.pactomataatlantica.org.br. Access on: 10 Jul. 2024
- White, B. L. A. & Silva, M. F. A. Variações microclimáticas e perigo de ocorrência de incêndios florestais em fragmentos de mata atlântica no município de São Cristóvão, Sergipe. *Nativa*. 2018; 6(1): 729-736.

White, J. C., Tompalski, P., Coops, N. C. & Wulder, M. A. Comparison of airborne laser scanning and digital stereo imagery for characterizing forest canopy gaps in coastal temperate rainforests. *Remote Sensing Environment*. 2018; 208(1): 1-14.

Zahawi, R. A., Reid, J. L. & Holl, K. D. Hidden costs of passive restoration. *Restoration Ecology*. 2014; 22(1): 284-287.

Zanini, A. M., Mayrinck, R. C., Vieira, S. A., Camargo, P. B. & Rodrigues, R. R. The effect of ecological restoration methods on carbon stocks in the Brazilian atlantic forest. *Forest Ecology and Management*. 2021; 481(1): 1-11.