

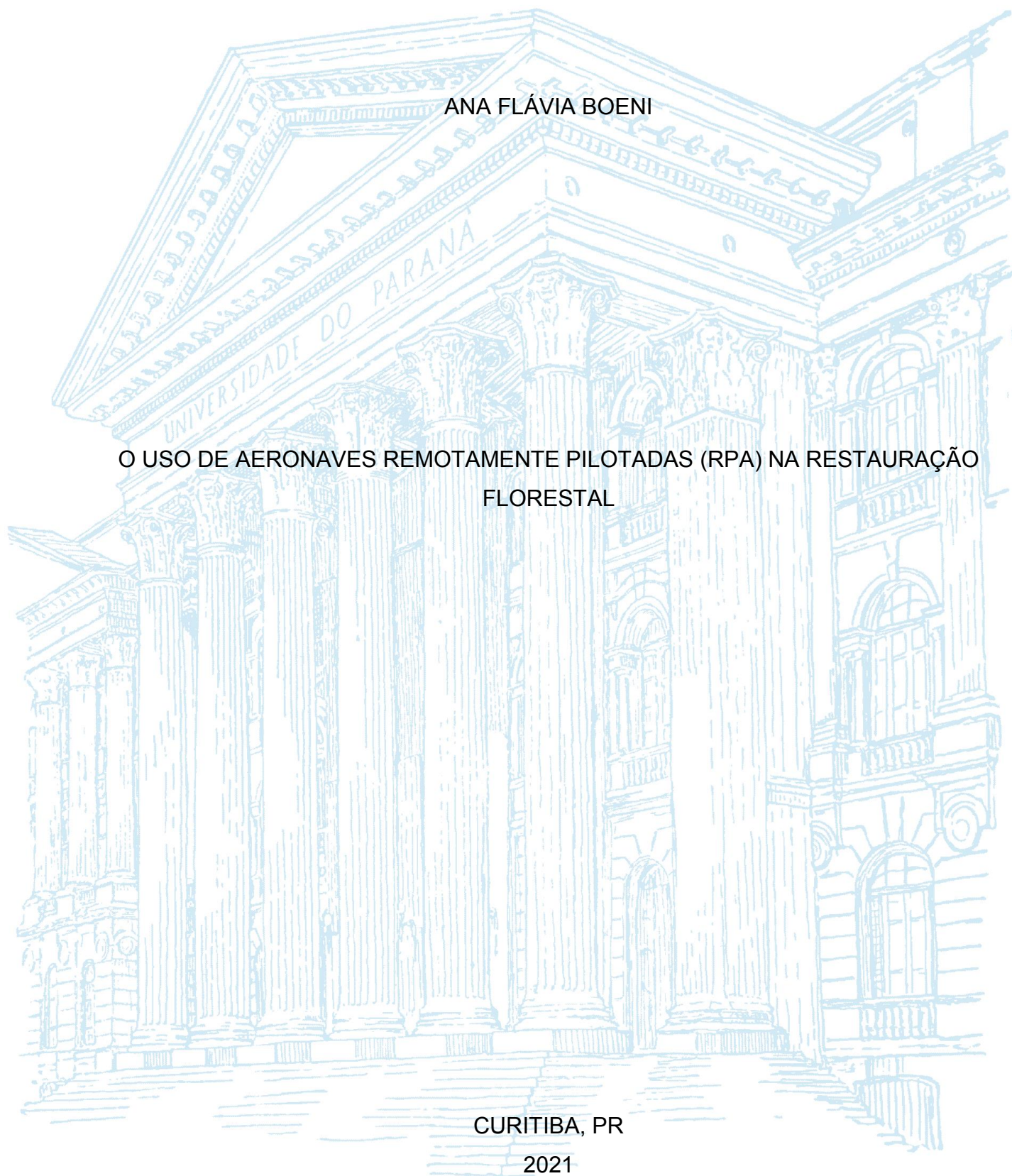
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA FLÁVIA BOENI

O USO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPA) NA RESTAURAÇÃO
FLORESTAL

CURITIBA, PR

2021



ANA FLÁVIA BOENI

O USO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS (RPA) NA
RESTAURAÇÃO FLORESTAL

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Gestão Florestal, no Curso de Pós-Graduação MBA em Gestão Florestal (EAD), Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Guilherme Molin

CURITIBA, PR

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Fundação Renova pela autorização do levantamento das imagens nas áreas de trabalho nos territórios do Baixo e Médio Doce, em especial àqueles que possibilitaram que as ações de restauração florestal fossem implantadas e que contribuíram para a logística de campo.

Ao meu orientador, Dr. Paulo Guilherme Molin, pela orientação e dicas de estudo.

A minha amiga Dra. Simone Magalhães, pela contribuição na geração dos mapas, entre outros auxílios importantíssimos.

Ao meu amigo de longa data Dr. Emanuel Araújo Silva, pela prestatividade, envio de materiais e demais revisões de texto.

Ao Flávio Mendes, pelas dicas e prestatividade.

Aos tutores e ao programa PECCA Gestão Florestal da UFPR em geral, pelo conteúdo passado e pela compreensão dos prazos, que tiveram que estendidos em função de pandemia de Covid-19 e demais compromissos profissionais.

RESUMO

A restauração florestal é um tema que vem crescendo e sendo aprimorada no Brasil desde a década de 80, assim como o sensoriamento remoto, que tem sido cada vez mais aplicado em diversas áreas de atuação, inclusive na gestão florestal. Uma grande facilidade é a utilização das aeronaves remotamente pilotadas (RPA), que possibilitam, ainda que em áreas menores, o levantamento de imagens aéreas de alta resolução e na periodicidade desejada pelos operadores. As aplicações das RPA são variadas e dependem dos recursos tecnológicos de cada uma. Porém considerando a popularização das RPA equipadas apenas com câmeras de sensores RGB, este documento buscou demonstrar suas possíveis aplicações na restauração florestal. O público alvo são os técnicos de campo ou especialistas que atuam na restauração florestal, que podem utilizar estas ferramentas para aprimorar a coleta de informações para diagnóstico e monitoramento das ações de restauração. Inicialmente foram apresentados alguns conceitos gerais de sensoriamento remoto, fotogrametria e índices de vegetação e resumiram-se os tipos de aeronaves não tripuladas, a legislação envolvida e alguns cuidados básicos para a operação. A segunda etapa deste documento foi um estudo de caso da bacia do rio Doce, em Minas Gerais e Espírito Santo. Para isso, foram realizados sobrevoos com uma RPA Phantom 4 Standart, equipada com uma câmera digital RGB, ao longo de 2020 e 2021, nos municípios de Galiléia/MG, Periquito/MG, São Vitor/MG, Marilândia/ES e Colatina/ES. As alturas de voo variaram entre 60 e 80 metros e as sobreposições de cenas entre 65% a 80%. Os voos foram realizados sobre áreas de pastagens, com incidência de processos erosivos, em regeneração natural, floresta em estágio inicial, monodominância de uma espécie florestal e áreas jovens em restauração florestal pelo método de plantio de mudas. Para demonstrar como as RPA podem contribuir com o diagnóstico ambiental, realizou-se uma seleção de imagens destas situações ambientais registradas nos sobrevoos, comparando-as com as imagens da realidade de campo, registradas com uma câmera Canon Powershot SX60. Para demonstrar as contribuições para o monitoramento ecológico, e principalmente para a avaliação da cobertura florestal de uma área em regeneração natural assistida e de um plantio de mudas, foram construídos no ArcGIS mapas dos índices de vegetação MPRI e SAVI adaptado, que só necessitam das bandas na faixa do RGB, utilizando os ortomosaicos gerados no DroneDeploy após os sobrevoos planejados. Posteriormente, foi utilizada a ferramenta de classificação supervisionada no ArcGIS para quantificar as áreas ocupadas por cada classe de uso do solo. Também foram exploradas algumas técnicas simples para fotointerpretação das imagens, como contagens de berços abertos, demonstração da presença de gramíneas, das falhas de plantio e da altura da vegetação em desenvolvimento. Tais técnicas podem ser adotadas pelos próprios técnicos envolvidos na restauração florestal ou com auxílio de especialistas em geoprocessamento de imagens. Apesar das limitações no uso de RPA apenas com câmeras RGB, eles podem representar ganho em eficiência e redução de custos na gestão da restauração florestal.

Palavras chaves: Sensoriamento remoto, fotogrametria, índices de vegetação, vegetação, gestão florestal

ABSTRACT

Forest restoration is growing and being improved in Brazil since the 1980s, as well as remote sensing, which is applied in several activities, including forest management. A great facility is the use of Remotely Piloted Aircraft (RPA), which allow, even in smaller areas, the survey of high resolution aerial images and at the desired frequency by the operators. The RPA applications vary and depend on the technological resources of each one. However, considering the popularization of RPA equipped only with RGB sensor cameras, this document aims to demonstrate their possible applications in the forest restoration. The target audience are the field technicians or specialists who work in forest restoration, who can use these tools to improve the data collection for diagnosis and monitoring of restoration actions. Initially, were presented general concepts of remote sensing, photogrammetry and vegetation indices and the types of unmanned aircrafts. We also summarized the involved legislation and the basic precautions for the flights operation. The second part of this document was a case study of the Doce river basin, in Minas Gerais (MG) and Espírito Santo (ES) states. For this purpose, overflights were carried out with an RPA Phantom 4 Standard, equipped with an RGB digital camera, throughout 2020 and 2021, in the municipalities of Galiléia/MG, Periquito/MG, São Vitor/MG, Marilândia/ES and Colatina/ES. Flight heights ranged from 60 to 80 meters and scene overlaps from 65% to 80%. The flights were carried out above pasture areas, as well as those with incidence of erosive processes, in natural regeneration, young natural forests, monodominant forest stands and young areas in restoration process by the seedling planting method. In order to demonstrate how the RPA can contribute to the previous diagnosis, a selection of images of these environmental situations recorded in overflights was carried out, comparing them with the field reality images, recorded with a Canon Powershot SX60 camera. To demonstrate the contributions to ecological monitoring, and especially to the assessment of forest cover in an area undergoing assisted natural regeneration and another by the seedlings planting method, maps of the MPRI and adjusted SAVI vegetation indices were built in ArcGIS, using the orthomosaics generated in DroneDeploy after the planned overflights. Subsequently, the supervised classification tool in ArcGIS was used to quantify the areas occupied by each land use class. Some simple techniques for photointerpretation of the images were also explored, such as counting of open planting holes, demonstrating the presence of exotic grasses, the planting failures and the height of the developing vegetation. Such techniques can be adopted by the technicians involved in forest restoration or with the help of specialists in image geoprocessing. Despite the limitations of RPA equipped only with RGB sensor cameras, they can represent a gain in efficiency and a reduction in costs in the management of forest restoration.

Keywords: Remote sensing, photogrammetry, vegetation indices, vegetation, forest management

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição da intensidade da energia emitida pelas fontes naturais de radiação eletromagnética, medidas no topo da atmosfera.	17
Figura 2: Comportamento espectral da energia refletida de diferentes alvos naturais.....	18
Figura 3: Diagrama esquemático da nomenclatura envolvendo as aeronaves não tripuladas.	24
Figura 4: Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) DJI Phantom 4, com uma câmera digital RGB embarcada.....	25
Figura 6: Interface inicial para criar o plano de voo no DroneDeploy.....	31
Figura 6: Interface inicial para criar o plano de voo no DroneDeploy, com ênfase nas configurações avançadas.	32
Figura 7: Exemplo das interfaces do aplicativo DJI Go indicando que a aeronave está pronta (A) e do DroneDeploy, onde será executado o plano de voo (B).....	33
Figura 8: Exemplo de imagem obtida com a câmera desregulada.	36
Figura 9: Demonstração das amostras para treinamento do algoritmo da classificação supervisionada no ArcGis.	38
Figura 10: Exemplo de MDT gerado no software de pós-processamento DroneDeploy. Elaborado pela autora no DroneDeploy.....	41
Figura 11: Imagem aérea obtida com RPA em São Vitor, MG, indicando uma área de pastagem, com alguns pontos mais escuros representando a presença de algumas herbáceas e arbustos em meio a matriz de pasto. Fonte: Autora (2021)	42
Figura 12: Imagens da realidade do campo demonstrando a presença de herbáceas e arbustos esparsos em meio a pastagem em São Vitor, MG, em densidade aproximada de 400 indivíduos/hectare da espécie arbustiva assa-peixe (<i>Vernonia</i> sp). Fonte: Autora (2021)	43
Figura 13: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, indicando uma área de médio potencial de regeneração natural, com densidade de espécies arbustivo-arbóreas de aproximadamente 1.000 ind./ha e com sub-bosque composto por gramíneas e herbáceas (a esquerda da linha tracejada) e após controle de gramíneas	

com roçada mecanizada e abertura de berços de plantio (a direita). Fonte: Autora (2021)

..... 44

Figura 14: Imagens da realidade do campo de Galiléia, MG, demonstrando a presença de árvores esparsas com densidade de aproximadamente 1.000 ind./ha, demonstrando a esquerda da linha tracejada uma porção sem controle de gramíneas e a direita da linha tracejada a área com controle de gramíneas. Fonte: Autora (2021) 44

Figura 15: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, indicando uma área de médio potencial de regeneração natural, com densidade de espécies arbustivo-arbóreas de aproximadamente 1.100 ind./ha e com sub-bosque composto por gramíneas e espécies herbáceas. Fonte: Autora (2021)..... 45

Figura 16: Imagens da realidade do campo em Galiléia, MG, demonstrando a presença de árvores esparsas com densidade de aproximadamente 1.100 ind./ha, demonstrando o sub-bosque composto por gramíneas e herbáceas. Fonte: Autora (2021) 45

Figura 17: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, indicando uma área de médio potencial de regeneração natural, com densidade de espécies arbustivo-arbóreas de aproximadamente 1.100 a 1600 ind./ha, com sub-bosque composto por espécies gramíneas. Fonte: Autora (2021)..... 46

Figura 18: Imagens da realidade do campo em Galiléia, MG, demonstrando a porção de vegetação com aproximadamente 1.100 ind./ha e aquela com mais de 1.600 ind./ha. Fonte: Autora (2021)..... 46

Figura 19: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Colatina, ES, indicando uma área de médio potencial de regeneração natural, após ter sido um talhão de eucalipto, com densidade de espécies arbustivo-arbóreas de aproximadamente 1.100 a 1600 ind./ha, ocupada principalmente por assa-peixe (*Vernonia* sp). 47

Figura 20: Imagem da realidade do campo em Colatina, ES demonstrando a porção de vegetação com aproximadamente 1.100 a 1.600 ind./ha, ocupada principalmente por assa-peixe (*Vernonia* sp). 47

Figura 20: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, em 16/01/2020, indicando uma área de monodominância de aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Fr. All.). Fonte: Autora (2021)..... 48

Figura 21: Imagem externa com RPA, de 16/01/2020 (A) do padrão de uma área de monodominância de aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Fr. All.), e imagens do interior dos povoamentos (B e C), de 29/10/2019. Fonte: Autora (2021) 49

Figura 22: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, em 16/01/2020, indicando uma possível floresta em estágio inicial. Fonte: Autora (2021) . 51

Figura 23: Imagem externa com câmera digital em 16/01/2020 (A) do padrão de uma possível floresta em estágio inicial em Galiléia/MG, e imagens demonstrando a homogeneidade de espécies e estrato arbustivo-arbóreo (B e C). Fonte: Autora (2021) 52

Figura 25: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Periquito, MG, demonstrando a presença de processos erosivos (dentro dos polígonos vermelhos) nas áreas de interesse. Fonte: Autora (2021) 53

Figura 26 Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Periquito, MG, demonstrando a presença de processos erosivos nas áreas de interesse. Fonte: Autora (2021) 54

Figura 27: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, onde é possível visualizar a contagem dos berços abertos para a restauração florestal. Fonte: Autora (2021) 55

Figura 28: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, onde é possível visualizar a contagem das porções roçadas para coroamento (setas) de mudas para a restauração florestal. Fonte: Autora (2021) 56

Figura 29: Aplicação do índice MPRI sobre imagens de um sobrevoo de RPA Phantom 4 sobre um plantio de restauração florestal, capturadas em agosto de 2020 (esquerda) e fevereiro de 2021 (direita), em Colatina, ES. Fonte: Autora (2021) 58

Figura 30: Aplicação do índice SAVI adaptado (com $L = 0,5$) sobre imagens de um sobrevoo de RPA Phantom 4 sobre um plantio de restauração florestal , capturadas em agosto de 2020 (esquerda) e fevereiro de 2021 (direita). Fonte: Autora (2021) 59

Figura 31: Classificação supervisionada de um ortomosaico produzido por sobrevoo de RPA Phantom 4 sobre uma área em restauração florestal pelo método de Regeneração Natural Assistida, realizado em setembro de 2020 no município de Colatina, ES, Baixo Doce. Fonte: Autora (2021) 61

Figura 32: Aplicação do índice MPRI sobre imagens de um sobrevoo de RPA Phantom 4 sobre uma área em restauração florestal pelo método de Regeneração Natural Assistida, capturadas em agosto de 2020 no município de Colatina, ES, Baixo Doce. Fonte: Autora (2021) 62

Figura 33: Aplicação do índice SAVI adaptado (com $L = 0,5$) sobre imagens de um sobrevoo de RPA Phantom 4 sobre uma área em restauração florestal pelo método de Regeneração Natural Assistida, capturadas em agosto de 2020 no município de Colatina, ES, Baixo Doce. Fonte: Autora (2021) 63

Figura 34: Gráfico demonstrando a variação entre os percentuais de cobertura de solo dados pelas diferentes metodologias de avaliação..... 64

Figura 35: Imagem aérea obtida em fevereiro de 2021 com um RPA Phantom 4 em Colatina, ES (Baixo Doce), indicando a esquerda da linha tracejada um plantio total de mudas com aplicação de herbicida e subsolagem, e a direita da linha tracejada uma área de plantio sem controle químico das gramíneas do gênero *Urochloa* (braquiária), nem roçada. Fonte: Autora (2021)..... 65

Figura 36: Imagem aérea obtida em fevereiro de 2021 com um RPA Phantom 4 em Colatina, ES (Baixo Doce), indicando a esquerda da linha tracejada um plantio total de mudas com aplicação de herbicida e subsolagem, e a direita da linha tracejada uma área de plantio sem controle químico das gramíneas do gênero *Urochloa* (braquiária), nem roçada. Fonte: Autora (2021)..... 66

Figura 37: Imagem aérea obtida em setembro de 2020 com um RPA Phantom 4 no município de Marilândia, ES (Baixo Doce), indicando uma área de médio potencial de regeneração natural, com densidade de espécies arbustivo-arbóreas de aproximadamente 1.000 ind./há, após controle químico das gramíneas do gênero *Urochloa* (braquiária). Fonte: Autora (2021) 66

Figura 38: Imagens da realidade do campo da imagem aérea acima (Marilândia/ES), demonstrando a presença de gramíneas do gênero *Urochloa* (braquiária) antes do controle químico das gramíneas (A) e após o controle com aplicação de herbicida (B). Fonte: Autora (2021) 67

Figura 39: Imagem aérea obtida em fevereiro de 2021 com um RPA Phantom 4 no município de Colatina, ES (Baixo Doce), demonstrando a possibilidade de identificar as falhas de plantio após o crescimento inicial das mudas. Fonte: Autora (2021) 67

Figura 40: Exemplo de um trecho de MDS (esquerda) e de um MDT (direita) obtidos após pós-processamento no DroneDeploy das imagens obtidas por uma RPA Phantom 4 em fevereiro de 2021 em Colatina/ES, Baixo Doce. Fonte: Autora (2021) . 68

Figura 41: Mapa de altura do dossel, realizado com a subtração de um MDS pelo MDT em software SIG. Fonte: Autora (2021) 69

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. OBJETIVOS	15
1.1.1. Objetivo geral	15
1.1.2. Objetivos específicos	15
1.2. METODOLOGIA.....	16
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1. SENSORIAMENTO REMOTO	16
2.2. FOTOGRAMETRIA	18
2.3. PRODUTOS GERADOS POR AEROFOTOGRAMETRIA	19
2.3.1. Ortofotos e ortomosaico	19
2.3.2. MDT - Modelo Digital de Terreno e MDS – Modelo digital de Superfície 20	
2.4. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	20
2.4.1. Índice NDVI.....	21
2.4.2. Índice MPRI	22
2.4.3. Índice SAVI adaptado	22
2.5. TIPOS MAIS COMUNS DE RPA.....	23
2.5.1. Sensores embarcados	25
2.5.2. Sistema GNSS embarcado	26
2.6. APLICAÇÕES DAS RPA NA ÁREA FLORESTAL	27
2.6.1. RPA comercial com câmeras digitais RGB	27
2.6.2. RPA com sensores multiespectrais.....	27
2.6.3. RPA com sensores hiperspectrais	28
2.6.4. RPA com sensores LiDAR	28
2.7. LEGISLAÇÃO BÁSICA ENVOLVENDO RPA	29
2.8. OPERANDO AS RPA.....	30
2.8.1. Plano de voo	30
2.8.2. Cuidados a serem tomados antes e durante a execução	33
2.8.3. Pontos de controle	34
2.8.4. Processando as cenas.....	35

2.8.5. Problemas de regulagem da câmera	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4. RESULTADOS	40
4.1. CONTRIBUIÇÕES PARA O DIAGNÓSTICO AMBIENTAL.....	40
4.1.1. Obtenção de Modelo Digital do Terreno (MDT) e perfis de declividade	40
4.1.2. Áreas que não possibilitam o aproveitamento inicial da regeneração natural.....	41
4.1.3. Áreas com médio e alto potencial de regeneração.....	43
4.1.4. Áreas com monodominância de uma espécie arbórea.....	48
4.1.5. Áreas de floresta em estágio inicial de regeneração	49
4.1.6. Áreas com processos erosivos.....	52
4.2. PROCEDIMENTOS PARA MONITORAMENTO ECOLÓGICO	54
4.2.1. Contagem de berços abertos/coroamento	54
4.2.2. Avaliação da cobertura florestal	56
4.2.3. Presença de gramíneas ou aplicação de herbicida	64
4.2.4. Avaliação das falhas de plantio	67
4.2.5. Avaliação da altura do dossel.....	68
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
REFERÊNCIAS.....	70

1. INTRODUÇÃO

Muitos fatores afetam o sucesso das ações de restauração florestal, como por exemplo o histórico de uso do solo, a resiliência do local, a presença de fragmentos florestais na paisagem para permitir a dispersão de propágulos, os objetivos propostos para a restauração, a disponibilidade de recursos financeiros, entre outros (Holl & Aide, 2011). Apesar de existirem premissas básicas a serem seguidas para a definição das melhores estratégias de restauração florestal, nem sempre o processo de restauração terá o mesmo comportamento em distintas regiões (Meli et al., 2017). No entanto, numa visão geral, plantios com mudas em área total são necessários quando as áreas foram muito degradadas, não apresentando mais resiliência local, e quando a paisagem é insuficiente para a dispersão dos propágulos (Brancalion et al., 2015). Em contrapartida, quando no local a ser restaurado há certa expressão da regeneração natural, esta pode, e deve ser aproveitada na restauração florestal (Boeni, 2016; Chazdon, 2014). Para acelerar a regeneração natural e transformá-la em método de restauração é possível conduzir aqueles indivíduos da regeneração florestal através do coroamento e adubação, prática que é chamada de condução da regeneração natural ou regeneração natural assistida (Brancalion et al., 2015). Adicionalmente, quando muito heterogênea ou pobre em riqueza de espécies, utilizam-se técnicas complementares como o adensamento e enriquecimento com plantio de mudas (Boeni, 2016).

A temática envolvendo a restauração florestal ainda apresenta diversas lacunas de conhecimento a serem preenchidas, além do aperfeiçoamento de técnicas para seu planejamento e monitoramento. Previamente a tomada de decisões para um projeto de restauração florestal é necessária a realização de um bom diagnóstico ambiental, onde serão consideradas questões como os objetivos e recursos disponíveis ao projeto, matriz de paisagem e contexto histórico onde a área a restaurar está inserida, assim como qual a resiliência e potencial de regeneração do local (Bustamante et al., 2019; Moraes et al., 2010; Rodrigues et al., 2011).

Normalmente, em escala regional, são realizadas análises de paisagem com as imagens de satélite, e em escala local, é realizado um levantamento de campo mais detalhado a fim de quantificar e qualificar a regeneração natural pré-existente e verificar

a presença de filtros para a restauração (presença de animais cultivados, espécies competitivas, problemas de compactação ou erosões de solo, saturamento hídrico), etc (Reis et al., 2019).

Após implantado o projeto de restauração, é necessário partir para as etapas posteriores de monitoramento e avaliação, que indicarão se os objetivos do projeto estão sendo atingidos, se devem ser adotadas ações de manutenção corretiva, ou quais outras ações devem ser tomadas (Boeni, 2016; Mônico, 2012).

A curto prazo, pode ser necessário verificar a sobrevivência das mudas plantadas, ou o crescimento em altura dos regenerantes conduzidos, e/ou se há filtros ecológicos a serem rapidamente removidos. Administrativamente, também pode ocorrer a necessidade de fiscalização de determinadas orientações e/ou técnicas estão sendo seguidas pelas empresas executoras, como é o caso do coroamento, roçadas etc. A médio e longo prazo mais indicadores vão sendo usados, como densidade e espécies de regenerantes, cobertura de dossel, altura da vegetação nativa, etc.

Todas essas etapas demandam exaustivos processos de levantamentos de campo, principalmente se forem processos de restauração em larga escala. No entanto, nas últimas décadas aumentaram-se as opções de obtenção de dados por sensoriamento remoto (SR), que consiste basicamente na utilização de sensores acoplados em aeronaves, satélites ou outras plataformas para gravar informações da interação da radiação eletromagnética com as superfícies terrestres (Almeida et al., 2020; Chaves et al., 2015) .

Atualmente a utilização de **Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA)** tem se destacando como uma plataforma para o Sensoriamento Remoto em diversas áreas de aplicação (Eugenio et al., 2020; Reis et al., 2019), pois são uma forma barata de obtenção de imagens em alta resolução e com a periodicidade desejada, além de permitirem voos abaixo das nuvens, reduzindo esta limitação da aquisição de dados (Hao et al., 2021; Ruza et al., 2017). As RPA são aquelas aeronaves que podem carregar distintos sensores, sendo que o piloto não está a bordo, mas controla aeronave remotamente por meio de uma interface de rádio controle (ANAC, 2017) e podem ser uma promessa para facilitar o diagnóstico ambiental prévio ou o monitoramento de áreas em processo de restauração ecológica (Reis et al., 2019). Porém poucos ainda são os trabalhos que

relacionam seu uso na restauração florestal, e os exemplos mais próximos para este tipo de aplicação são os trabalhos envolvendo a silvicultura (Hentz et al., 2018; Medauar et al., 2018).

Para este trabalho, apresentaremos uma revisão de aplicações das RPA como auxílio a restauração florestal. As imagens foram geradas na bacia do rio Doce, nas áreas de atuação da Fundação Renova, nos municípios de Galiléia, em Minas Gerais, e em Colatina, no Espírito Santo.

O público-alvo são os profissionais que trabalham com restauração florestal, sejam técnicos de campo ou especialistas, que necessitam de informações básicas a respeito da operação de aeronaves remotamente pilotadas e de como estas podem ser utilizadas para otimizar o planejamento e monitoramento da restauração florestal.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Apresentar as aplicações de uma aeronave remotamente pilotada (RPA) equipada com uma câmera digital RGB na restauração florestal, incluindo a etapa de diagnóstico ambiental e seu posterior monitoramento.

1.1.2. Objetivos específicos

- a) Abordar os conceitos gerais básicos para compreensão do uso das RPA na restauração florestal;
- b) Diferenciar os tipos de RPA e suas principais aplicações;
- c) Apresentar a legislação envolvida na operação das RPA;
- d) Demonstrar, com exemplos de campo, como uma RPA equipada com uma câmera digital pode ser utilizada no diagnóstico ambiental e no monitoramento da restauração florestal.

1.2.METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada uma busca na literatura científica, tanto em artigos científicos, como teses, dissertações e livros buscando resumir os conceitos sobre sensoriamento remoto, fotogrametria, principais índices de vegetação e pontos de controle no solo. Para a abordagem dos tipos de RPA e dos aplicativos que realizam planejamento de voo ou pós-processamento das cenas, a busca foi expandida para sítios eletrônicos de empresas e blogs de conteúdo técnico-científico.

Para explorar os usos das RPA na área florestal, a busca foi realizada na plataforma *Web of Science (WoS)*, contendo nos termos de busca as seguintes palavras-chaves "*Drone**" or "*vant**" or "*uav*" or "*uas*" or "*RPA*" or "*Unmanned Aerial Vehicle**" E "*ecological restoration*" OR "*forest restoration*" OR "*restoration ecology*" OR "*forest**". Foi realizada uma análise inicial dos títulos dos trabalhos e quando estes, ou os resumos, continham indícios de utilização de RPA na área florestal, os trabalhos eram lidos para buscar compreender quais as possibilidades de aplicações das RPA na área florestal. A busca foi realizada ao longo dos meses de janeiro e fevereiro de 2021. A legislação foi resumida após consultas aos sítios eletrônicos dos principais órgãos regulamentadores, análise das leis e respectivas resoluções.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1.SENSORIAMENTO REMOTO

Os feixes de luz são compostos por uma série de radiações eletromagnéticas de diferentes comprimentos de ondas, cores e espectros diferentes. Existe uma região do espectro eletromagnético visível a olho nu (luz visível), separados pelas bandas do Vermelho (*Red*), Verde (*Green*) e Azul (*Blue*), combinação conhecida como RGB (Figura 1). Além da faixa visível, destaca-se para o sensoriamento remoto da vegetação, a faixa do Infravermelho Próximo (*Near Infrared-NIR*) (Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E.; Kuplich, 2012). Cada objeto interage com o espectro eletromagnético de diferentes formas, refletindo mais ou menos de acordo com os comprimentos de onda (Figura 2) (Pacheco et al., 2006).

Quando a luz solar atinge objetos terrestres, parte dela é absorvida, transmitida e refletida, sendo que cada objeto interage de forma diferente de acordo com as suas propriedades físico-químicas. Esta parte da luz que é refletida pode ser capturada por sensores específicos. O sensoriamento remoto é então, a obtenção das informações de objetos-alvo, com auxílio destes sensores, que capturam a interação dos alvos com a radiação eletromagnética, sem necessidade de contato físico com eles (Meneses et al., 2012; Novo, 2010). Cada objeto interage com o espectro eletromagnético de diferentes formas, refletindo mais ou menos em determinados comprimentos de onda (Figura 2), formando a sua assinatura espectral (Pacheco et al., 2006).

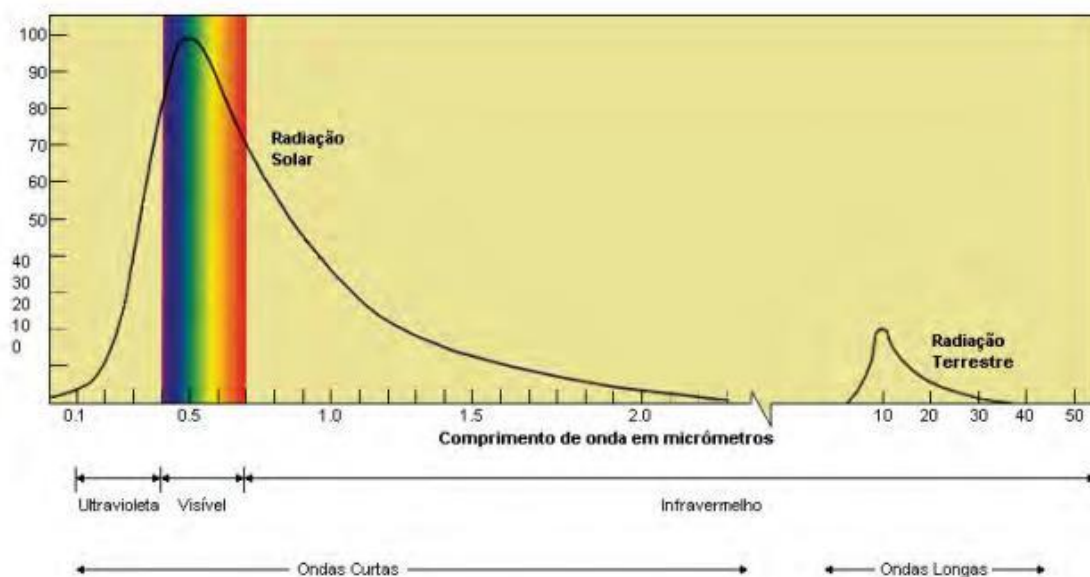


Figura 1: Distribuição da intensidade da energia emitida pelas fontes naturais de radiação eletromagnética, medidas no topo da atmosfera.

Barras indicam a região de comprimento de onda de máxima emitância. Fonte: Meneses et al., 2012

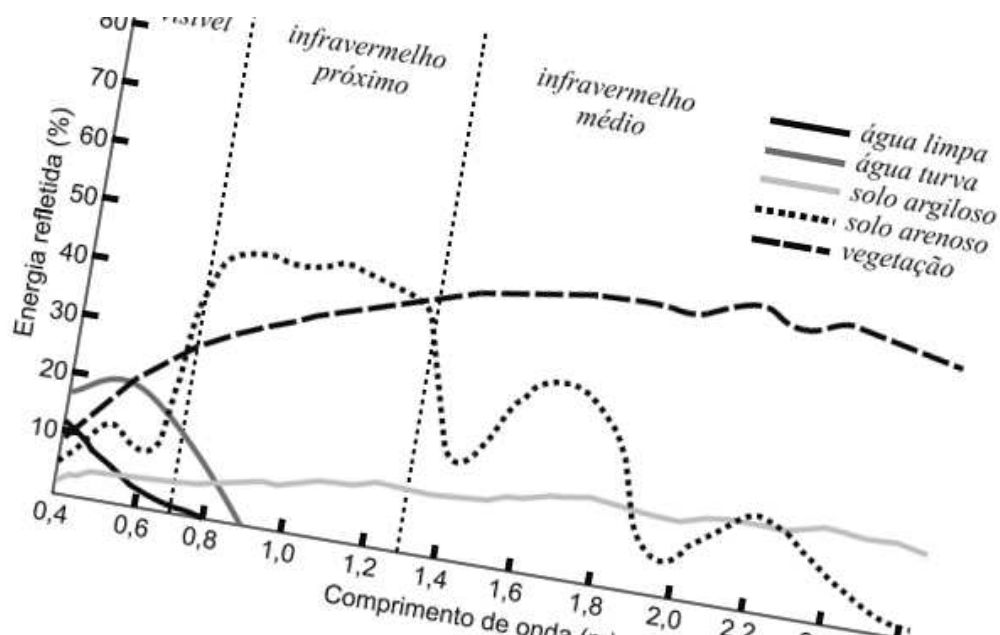


Figura 2: Comportamento espectral da energia refletida de diferentes alvos naturais.
Fonte: Pacheco et al., 2006

2.2.FOTOGRAMETRIA

Desde o início do século XX, o monitoramento da superfície da terra conta com o auxílio da Fotogrametria aérea (Aerofotogrametria), que nada mais é do que a obtenção de informações de objetos físicos e do meio ambiente visando obter um modelo tridimensional por medidas e interpretações de imagens de fotografias aéreas (Duran & Atik, 2021; Morgan et al., 2010).

Com o passar do tempo e o avanço das tecnologias, houve grande evolução nas técnicas, sendo que até meados dos anos 90 se utilizavam fotografias analógicas capturadas por aviões, que foram sendo equipados com câmeras digitais para obtenção de fotografias digitais (Morgan et al., 2010). Estas podem ser de diversos formatos (pequeno, médio e grande), sendo que as de grandes formatos produzem imagens com desempenho igual ou superior as de grandes formatos analógicas (Temba, 2000).

A fotogrametria pode ser interpretativa, também chamada de Fotointerpretação, quando objetiva examinar a forma, tamanho, padrão, textura e tonalidade para identificar quais são os objetos. Ou pode ser fotogrametria métrica, que consiste na medição das fotografias e outras feições para determinar o posicionamento relativo dos objetos através

de medidas de distâncias, ângulos, áreas, volumes, elevações e tamanhos (Temba, 2000).

É preciso realizar um pós-processamento digital para a fusão das imagens, estabilização das correspondências entre elas e identificação dos pontos homólogos. A partir de então, é gerado um ortomosaico, possibilitando a determinação das coordenadas x , y e z , dos pontos combinados, onde cada pixel da imagem tem suas coordenadas, e uma nuvem de pontos tridimensionais (modelo 3D) a partir de modelos matemáticos (Nex & Remondino, 2014).

Em função desse desenvolvimento da tecnologia, as pesquisas no setor florestal envolvendo Fotogrametria e Fotointerpretação aumentaram nos últimos anos (Blunk, 2019). Recentemente, as Aeronaves Não Tripuladas os têm contribuído para coletar dados para a fotogrametria de áreas pequenas (Senkal et al., 2021).

2.3.PRODUTOS GERADOS POR AEROFOTOGRAMETRIA

2.3.1. Ortofotos e ortomosaico

Em um aerolevantamento são obtidas fotografias aéreas de determinada região de interesse em uma perspectiva central cônica, ou seja, no centro da imagem a visada é ortogonal (projeção oblíqua, ângulo de 90°), mas à medida que se aproximam das bordas da imagem, a projeção é oblíqua, afetando a escala de visada dos objetos. Além disso, as imagens podem ter distorções causadas pelos efeitos do relevo sobre estas perspectivas. Para corrigir tais deformações com a ortorretificação e criar um ortomosaico através da união de várias ortofotos. Basta que as imagens aéreas apresentem uma taxa de sobreposição entre 60% e 80%, pois a partir daí os softwares irão identificar pontos homólogos (pontos iguais) entre elas e corrigir as distorções, visando criar uma única imagem aérea corrigida, onde os objetos imageados estarão em suas reais posições ortográficas, tornando-a um produto cartográfico de alta precisão (Blunk, 2019). Alta sobreposição de imagens é necessária para evitar erros na reconstrução tridimensional (Remondino & Gerke, 2015).

Câmeras de baixo custo acopladas em RPA são usadas com frequência, e combinados com os algoritmos conhecidos como *Structure from Motion* (SfM) e *Multi-*

View Stereo (MVS), normalmente disponíveis em softwares de códigos abertos, realizam o processamento deste conjunto de dados de imagens (Farella et al., 2020).

2.3.2. MDT - Modelo Digital de Terreno e MDS – Modelo digital de Superfície

Modelos digitais são as representações matemáticas da distribuição espacial de superfícies terrestres. Basicamente representam a união das informações de um levantamento planialtimétrico, normalmente adquiridas por meio da Topografia, representados de forma tridimensional por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) contém duas informações:

i) os Modelos Digitais de Terreno (MDT), que como o nome informa, não levam em consideração o que se encontra posicionado na superfície do terreno, sendo a medição considerada a nível do solo. Eles são obtidos por meio de algoritmos que classificam o retorno do que chega ao chão (Almeida, 2018);

ii) os Modelos Digitais de Superfície (MDS), que consideram os objetos existentes sobre os terrenos, como por exemplo a cobertura vegetal, construções, etc. São obtidos por falsos retornos, dados pelos máximos valores das coordenadas z de um determinado conjunto de pontos (Almeida, 2018).

Com a diferença entre esses modelos pode-se obter um modelo básico da altura da vegetação.

2.4. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Além da obtenção das ortofotos, ortomosaicos e modelos digitais, é possível a aplicação de técnicas de transformação de imagens com algoritmos a partir das informações espectrais delas, combinando duas ou mais bandas do espectro eletromagnético para realçar determinados padrões e obter indicadores numéricos adimensionais (Gameiro et al., 2016).

A vegetação tem uma assinatura espectral na região do visível que indica alta absorção na banda situada no vermelho (R), devido à presença em sua constituição do pigmento verde clorofila, e reflectância no comprimento de onda na região da verde (G),

indicativo de uma vegetação sadia, conforme (Meneses et al., 2012). No entanto, fora do espectro do visível, a mais alta reflectância da vegetação se dá na região do Infravermelho próximo (NIR). Por isso, os índices de vegetação (IV) normalmente combinam essas bandas para a criação de indicadores.

Existem vários índices de vegetação, os quais são importantes para maximizar a sensibilidade a parâmetros biofísicos das plantas e normalizar os efeitos internos (Schadeck et al., 2019). Podem ser úteis para verificar variações no substrato abaixo do dossel, incluindo topografia, indicar a abundância relativa, a atividade de vegetação verde, incluindo índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde, e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA). Também podem ser analisados em sinergia a algum parâmetro biofísico mensurável, tais como a biomassa, o IAF ou AAPAR, para fins de validação e de controle de qualidade (Schadeck et al., 2019).

2.4.1. Índice NDVI

Atualmente, o Índice de vegetação mais utilizado é NDVI – Índice de vegetação de diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Yang et al., 2021), que representa uma relação entre a banda do infravermelho próximo e do vermelho, com valores variando de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais saudável a vegetação, e quanto mais próximo de -1, a vegetação pode estar sem atividade ou o local pode ser um solo exposto (Meneses et al., 2012).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

NDVI = Índice de Vegetação de diferença normalizada

NIR = Banda do Infravermelho próximo

R = Banda do Vermelho (Red)

2.4.2. Índice MPRI

Outro índice de vegetação, ainda com poucos estudos, mas que aparentemente traz resultados que se aproximam de um NDVI é o MPRI – Índice de Refletância Fotoquímica Modificado (*Modified Photochemical Reflectance Index*). Este índice também se baseia na diferença normalizada entre duas bandas, mas neste caso propõe a substituição do infravermelho pelo verde na equação do NDVI (Magalhães et al., 2019), o que se configura uma vantagem, pois pode então ser obtido com câmeras digitais que capturam imagens na região do visível, ou seja, nas bandas RGB.

$$MPRI = \frac{G - R}{G + R}$$

MPRI = Índice de Refletância Fotoquímica Modificado

G = Banda do Verde (Green)

R = Banda do Vermelho (Red)

O comportamento do MPRI é similar ao comportamento do NDVI para os alvos Solo e Vegetação, porém não recomendado para o alvo Corpos D'água (Linhares et al., 2013). Assim, o MPRI tem potencial para ser aplicado em análises que envolvam a alteração entre os alvos Solo e Vegetação, como: Desmatamento, Reflorestamento, Manejo de Áreas Agrícolas, entre outros.

2.4.3. Índice SAVI adaptado

Alguns índices também sofrem influência, no cálculo, dos efeitos de reflectância do solo no local avaliado. Um índice que se propõe a minimizar esse efeito é o Índice de Vegetação Solo Ajustado - SAVI (*Vegetation Index Soil-Adjusted*) (Magalhães et al., 2019).

Este índice é uma adaptação ao NDVI, onde foi proposta a aplicação de uma constante L, para minimizar os efeitos do solo no cálculo do índice vegetativo (Huete, 1988). Varia de 0,25 a 1, de acordo com a densidade da vegetação, sendo que para áreas com pouca cobertura vegetal adota-se o valor de 1 para L, para as áreas com uma cobertura intermediária, adota-se um valor de 0,5 e para áreas muito densas adota-se o

valor de 0,25. Quando L é nulo, o SAVI torna-se igual ao NDVI (Linhares et al., 2013; Magalhães et al., 2019).

Para aproveitar as imagens das câmeras RGB, alguns autores criaram um SAVI adaptado, em que no lugar da banda do Infravermelho, utilizaram a banda do Verde, e o resultado foi semelhante. Ressalta-se que utilizaram as bandas RGB normalizadas.

$$SAVI_{adaptado} = \frac{(1 + L) \times (Gn - Rn)}{L + Gn + Rn}$$

SAVI adaptado = Índice de Vegetação Solo Ajustado – SAVI

L = Constante variando de 0,25 para áreas de cobertura vegetal densa, 0,5 para áreas de cobertura vegetal intermediária e 1 para áreas com pouca cobertura vegetal.

$Rn = \text{Vermelho} / (\text{Verde} + \text{Vermelho} + \text{Azul})$

$Gn = \text{Verde} / (\text{Verde} + \text{Vermelho} + \text{Azul})$

$Bn = \text{Azul} / (\text{Verde} + \text{Vermelho} + \text{Azul})$

2.5. TIPOS MAIS COMUNS DE RPA

Para entender melhor o que é uma **RPA (Aeronave Remotamente Pilotada)**, primeiramente é preciso entender o que é uma **Aeronave Não Tripulada**, que substituiu o obsoleto termo VANT (veículo Aéreo Não Tripulado, adaptado do inglês *Unmanned Aerial Vehicle* – UAV). De acordo com a definição do DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo), uma Aeronave Não Tripulada é “qualquer aparelho que pode se sustentar na atmosfera a partir de reações do ar, e que se pretende operar sem um piloto a bordo”. Os termos VANT ou UAV acabaram se tornando obsoletos, pois as principais organizações da aviação empregam o termo aeronaves, ao invés de veículos, e envolvem um sistema que vai além da aeronave. Portanto, atualmente utiliza-se o termo genérico UAS, do inglês *Unmanned Aircraft Systems* (da Silva, 2018).

Podem ser subdivididas em duas categorias (Figura 3):

- i) **Aeronaves Autônomas**, que uma vez programadas, não permitem intervenção externa durante a realização do voo. São proibidas no Brasil.
- ii) **Aeronaves Remotamente Pilotadas**, que recebem a sigla de RPA em função do termo em inglês *Remotely Piloted Aircraft*, (foco deste

documento). Nas RPA, mesmo que o piloto não esteja a bordo, consegue controlar a aeronave remotamente através de outras interfaces, como computador, controle remoto, celular. Considerando que a operação necessita de um sistema, criou-se o termo Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS), que integra tanto as aeronaves, quando a estação de pilotagem, o enlace de pilotagem e qualquer outro componente associado à operação (ANAC, 2017), conforme Figura 3.

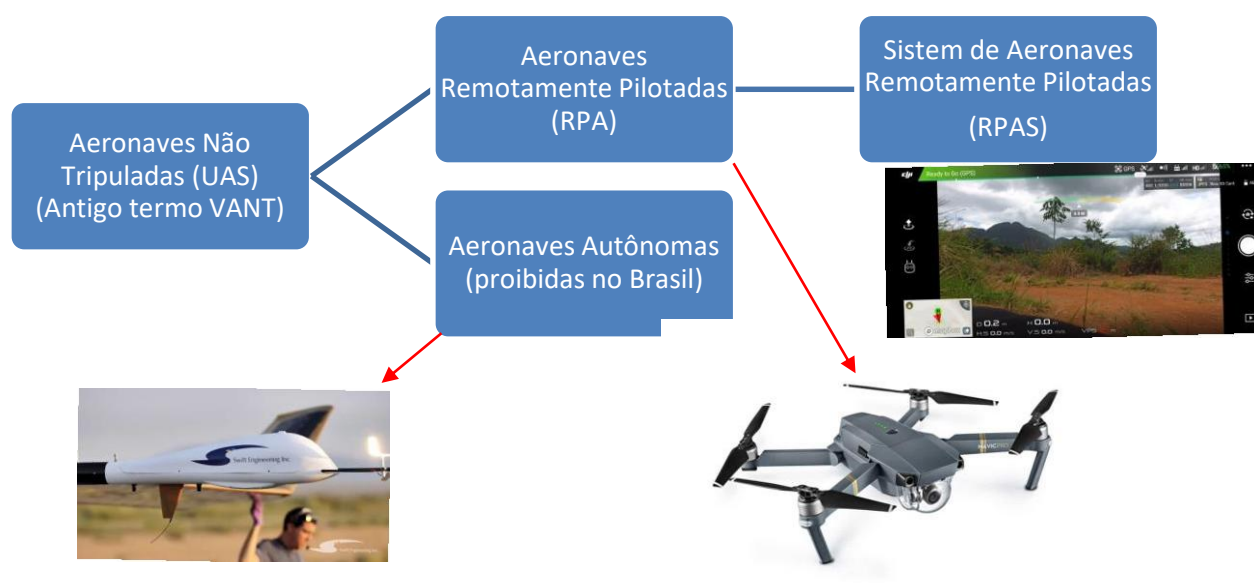


Figura 3: Diagrama esquemático da nomenclatura envolvendo as aeronaves não tripuladas.
Fonte: Autora (2021)

Existem vários tipos de UAS, classificados de acordo com suas características técnicas (aerodinâmica, tamanho, dinâmica de voo), como os de asas fixas, asas rotativas (multirotor), dirigíveis, balões de ar, batedores de asas ou híbridos (Blunk, 2019; da Silva, 2018). Destacam-se as aeronaves de asas fixas e rotativas (multirotor) (Nex & Remondino, 2014).

Os de asas fixas se assemelham muito a aviões, possuem maior autonomia de voo e cobrem áreas maiores, porém apresentam restrições para decolagem e pouso e são menos versáteis (Ataíde, 2016).

Os tipos mais utilizados são os multirotores, também usualmente conhecidos como “drones”, pois são mais flexíveis em suas direções de voo, apresentando diferentes possibilidades no mapeamento, mas abrangem áreas menores de recobrimento (Blunk, 2019; Ozdemir et al., 2014).

2.5.1. Sensores embarcados

As RPA comerciais de menor custo (Figura 4) são normalmente equipadas apenas com câmeras digitais que permitem capturar imagens nas bandas da faixa do espectro visível, ou seja, RGB (Red - Vermelho, Green - Verde, Blue - Azul), possibilitando a obtenção de imageamento de alta resolução. No entanto, é possível realizar adaptações nas RPA, implementando diferentes sensores às aeronaves de acordo com as distintas aplicações desejadas, a depender da capacidade de carga da RPA (Hentz et al., 2018; Nex & Remondino, 2014; Salamí et al., 2014).



Figura 4: Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) DJI Phantom 4, com uma câmera digital RGB embarcada.

Fonte: Autora (2021)

Exemplos destas adaptações são: **i) os sensores multiespectrais**, que capturam as faixas do espectro de luz do azul, verde, vermelha, vermelha, Infravermelho Próximo (NIR) e do visível (RGB) (Hao et al., 2021); **ii) os sensores hiperspectrais**: que capturam

dezenas ou centenas de bandas espectrais estreitas, permitindo obter informações sobre as características propriedades físico-químicas dos objetos na superfície imageada, incluindo composição química e bioquímica (Zhong et al., 2020), e **iii) os sensores LiDAR** (*Light Detection and Ranging*), emitem diversos pulsos de laser para detectar as superfícies, construindo uma nuvem de milhares de pontos 3D (Almeida et al., 2020; Swinfield et al., 2019).

2.5.2. Sistema GNSS embarcado

O GNSS representa o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), um dos mais usados mundialmente já que oferece uma gama de aplicações, como por exemplo o GPS, Galileo, Glonass, etc. (Naeem et al., 2021). O GNSS permite que um usuário tenha acesso ao cálculo de suas coordenadas em qualquer lugar do planeta e a qualquer horário. Por conta disso, as RPA se beneficiam do GNSS para se localizarem em determinado ponto no globo, através da obtenção das coordenadas geodésicas, cuja posição específica é definida por uma latitude X, longitude Y e altitude Z.

Em geral, as RPA possuem apenas um receptor GNSS multiconstelação, que provê uma localização absoluta no sistema de coordenadas, gerando um erro XY de cerca de 5 metros e 15 metros no Z (Santos Santana et al., 2021). Para suprimir este problema, algumas aeronaves possuem sistemas receptores GNSS de posicionamento cinemático em tempo real (*Real Time Kinematic – RTK*), que apresentam precisão e acurácia muito maiores, com precisão na casa dos centímetros (Brunier et al., 2016; Zhang & Hsu, 2018). Quando não é possível a correção de coordenadas automaticamente em tempo real (RTK), elas podem ser corrigidas com o pós-processamento PPK (*Pos Processing Kinematic – PPK*), que é uma prática muito comum após voos de aeronaves não tripuladas (UAV).

O uso do modo RTK e PPK é possível porque algumas aeronaves são equipadas com frequência L1/L2, e, portanto, apresentam maiores precisões nas coordenadas X, Y e Z, permitindo ainda a correção diferencial (em tempo real ou pós-processada). Quando elas não são equipadas com esta frequência, e a construção dos ortomosaicos mais precisos são uma necessidade, devem ser realizadas correções com base nas coordenadas dos pontos de controle (Santos Santana et al., 2021) (também conhecidos

como GCP – “*Ground Control Point*”), obtidos em solo, com auxílio de uma estação total ou receptores GNSS de precisão.

2.6. APLICAÇÕES DAS RPA NA ÁREA FLORESTAL

A utilização dos RPA na área florestal pode variar muito dependendo do tipo de equipamento e de seus recursos tecnológicos. Podem ser realizadas avaliações de estoque de madeira quantificação de volume, diagnóstico ambiental, monitoramento de vegetação e de focos de incêndio, identificação de espécies, dispersão de agentes biológicos, bem como estudos de silvicultura (Nex & Remondino, 2014; Salamí et al., 2014), entre outros. Para o fim deste estudo, foca-se nas aplicações de RPA imageadoras.

2.6.1. RPA comercial com câmeras digitais RGB

Grande parte dos RPA comerciais e de custos menores são equipados apenas com câmeras digitais de alta resolução que permitem a captura de imagens na faixa do espectro visível, ou seja, nas bandas RGB (Red, Green, Blue). Com estes aparelhos é possível realizar o imageamento da paisagem e a obtenção da nuvem de pontos tridimensionais, permitindo, com o auxílio de softwares específicos, a construção de Modelos Digitais de Superfície (MDS) e de Modelos Digitais de Terreno (MDT).

Assim, é possível realizar o mapeamento com a classificação do uso do solo, criar mapas de índices de vegetação que trabalhem com as bandas do RGB, estimar a altura da floresta e a densidade de mudas.

A partir das imagens RGB não é possível calcular o Índice de Vegetação NDVI, pois não há informações sobre a banda do infravermelho, porém é possível calcular o MPRI e SAVI adaptado, que apresentam resultados semelhantes (Linhares et al., 2013).

2.6.2. RPA com sensores multiespectrais

Os sensores multiespectrais têm como vantagem a captura da banda do Infravermelho próximo, que permite a obtenção do Índice de Vegetação NDVI

(*Normalized Difference Vegetation Index*), muito utilizado para a análise da cobertura vegetal, pois reflete o verde da vegetação através dos dados de reflexão do vermelho e infravermelho próximo (Yang et al., 2021). Com o avanço da tecnologia, já existem grandes fabricantes de RPA comercializando aeronaves com este tipo de sensor diretamente de fábrica, porém o custo é maior.

2.6.3. RPA com sensores hiperspectrais

Os sensores hiperspectrais, por capturarem muitas bandas espectrais estreitas, permitem obter informações sobre as características propriedades físico-químicas. Com isso, são muito utilizados na agricultura e silvicultura de precisão, para detectar níveis de clorofila, por exemplo (Amirruddin et al., 2020; Zhu et al., 2020).

2.6.4. RPA com sensores LiDAR

Os sensores a laser são sensores ativos, que emitem seus próprios feixes de luz, e como são centenas de milhares de ondas eletromagnéticas por segundo no infravermelho próximo (comprimento de onda de ~ 900 nm), conseguem atingir alvos florestais (solo, galhos e folhas), e permitem descrever a estrutura florestal de uma forma tridimensional com base no tempo da emissão do pulso para retornar (Almeida et al., 2020; Reis et al., 2019). Essa quantidade enorme de pulsos, penetra no dossel da floresta, registrando informações sobre o sub-dossel, o sub-bosque e a vegetação do solo, e possibilitando a estimativa de clareiras (Salamí et al., 2014), biomassa aérea acima do solo, abertura de dossel, densidade de indivíduos, índice de área foliar, entre outros indicadores ecológicos, incluindo diversidade de espécies (Almeida et al., 2019; Almeida et al., 2020; Swinfield et al., 2019).

No entanto, a utilização de RPA com sensores *LiDAR* no monitoramento da restauração permanece pouco explorada, apesar do seu potencial em revelar informações funcionais e ecológicas detalhadas sobre a vegetação (Almeida et al., 2020). Um dos principais motivos é o alto custo associado nos equipamentos com sensores a laser.

Apesar das aplicações variadas dependendo do tipo de sensor embarcado, este documento objetiva explorar o que é possível com as RPA comerciais, ou seja, normalmente equipadas apenas com câmeras RGB.

2.7.LEGISLAÇÃO BÁSICA ENVOLVENDO RPA

O principal órgão regulador é a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Além disso, devem ser respeitadas as regulamentações da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).

A ANAC criou a Resolução nº 419, de 2 de maio de 2017, marco legal da operação de RPA no Brasil, para aprovar o **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial nº 94 (RBAC-E nº 94)**, intitulado “**Requisitos gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil**”. Neste documento, constam orientações gerais que devem ser cumpridas pelos pilotos, incluindo desde a fase de cadastro do dispositivo, quanto a operação.

Neste documento, a ANAC definiu diferentes classes de RPA de acordo com o peso do aparelho, sendo que Classe 1 são aquelas aeronaves com peso máximo de decolagem maior que 150 kg; Classe 2 aquelas entre 25 e 150 kg e Classe 3 aquelas com peso máximo de decolagem menor que 25 kg (e acima de 250 g), que se configuram na maior parte das RPA comerciais utilizados para levantamentos aéreos de áreas menores.

Algumas das recomendações deste regulamento são:

- Todas as aeronaves, com exceção daquelas com peso de decolagem menor que 250g, devem ser cadastradas no SISANT e devidamente identificadas em local visível (ANAC, 2021).
- As aeronaves cadastradas podem operar somente em território brasileiro.
- A distância de voo não poderá ser inferior a 30 metros horizontais de outras pessoas que não sejam o piloto ou as demais envolvidas na operação.
- É de responsabilidade dos pilotos remotos garantirem a segurança dos equipamentos e da operação de voo.
- As RPA Classe 3 que operam em “Linha de Visada Visual” (VLOS), até 500 metros de distância, e realizam voos de até 120 metros de altura (400 pés) têm regras

menos rígidas e não necessitam de certificados de aeronavegabilidade, ou seja, homologação de um registro na ANAC.

- Quando os voos são operados “Além da Linha de Visada Visual” (BVLOS) em aeronaves Classe 1 e 2, as regras de manutenção são mais rígidas, necessitam de controle e devem ser realizadas por profissional treinado.
- A ANAC também exige no Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial – RBAC–E nº 94 que qualquer pessoa que utilize RPA para fins profissionais e comerciais faça um plano de seguro básico da aeronave (seguro RETA), cobrindo nos mínimos danos a terceiros.

A ANATEL exige que as RPA com peso entre 250g a 25 kg (Classe 3) passem por um processo de regulamentação do equipamento para que não ofereçam interferências de tecnologia com radiofrequência (ANATEL, 2021). O DECEA também solicita um registro simples no SARPAS para declarar que a aeronave está dentro das normas estabelecidas pelo órgão e para cadastramento de planos de voos (DECEA, 2021). Para a realização de aerolevantamentos, é necessária uma Autorização de Voo do Ministério da Defesa (AVOMD), seguindo as regras dos tradicionais aerolevantamentos conforme Decreto-Lei nº 1.177/1971, regulamentado pelo Decreto nº 2.278/1997 e Portaria nº 953/2014 do Ministério da Defesa.

2.8. OPERANDO AS RPA

2.8.1. Plano de voo

Existem alguns softwares que realizam este tipo de planejamento, como por exemplo, o *DJI GroundStation* e o *DroneDeploy*, que apresenta modalidade gratuita para a elaboração do plano de voo.

Para construir um ortomosaico, um Modelo Digital de Terreno (MDT) ou Modelo Digital de Superfície (MDS) é necessário realizar um voo em que haja sobreposição mínima lateral e frontal de no mínimo 80% (Blunk, 2019; Remondino & Gerke, 2015)

De acordo com Berteska e Ruzgiene (2013) a altura de voo é um fator determinante na quantidade de fotografias, influenciando na qualidade dos Modelos

Digitais de Elevação – MDE e das ortofotos, juntamente com a exatidão dos pontos de apoio (GCP) e a resolução da câmera.

Alguns autores descobriram que imagens aéreas obtidas por alturas entre 60 e 80 m de altitude produziram uma boa quantidade de precisão na identificação de árvores individuais e delineamento de copas de árvores (Avtar et al., 2020). Além disso, Schadeck et al. 2019 verificaram que para a geração de ortomosaicos para MPRI, não houve diferenças entre voos realizados a 80 e 120 metros de altura, portanto para tal objetivo, devem ser analisadas as disponibilidades de bateria e tempo de voo.

2.8.1.1. DroneDeploy

A operação para elaboração de um plano de voo no DroneDeploy é simples (DroneDeploy, 2021). Após realizado o *login*, seleciona-se a criação de um novo Projeto (*Project*). Seleciona-se a cidade ou as coordenadas do local desejado. Criando o novo Projeto de voo (*Create New Project Here*), seleciona-se a opção de Mapas e Modelos (*Maps & Models*) e na aba *Fly* abrirá uma interface semelhante à Figura 5.

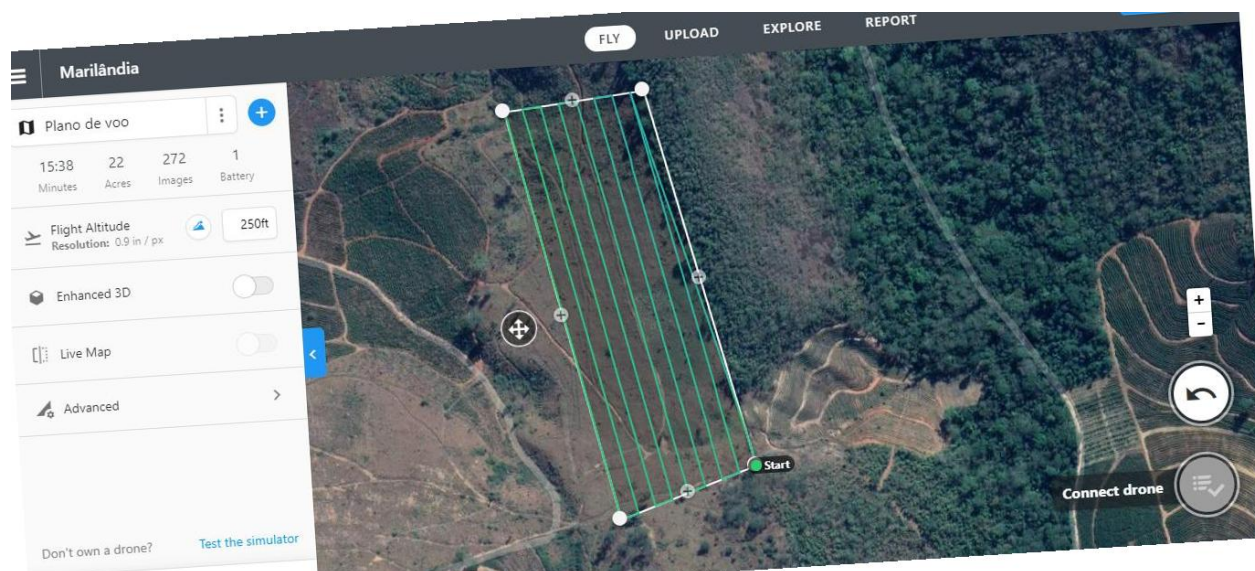


Figura 5: Interface inicial para criar o plano de voo no DroneDeploy.
Fonte: Autora (2021)

A esquerda da interface é possível ajustar a altura, selecionar a realização de voos em 3D e abrir as “Configurações Avançadas” (*Advanced*). Nelas o operador pode regular a sobreposição frontal e lateral, para as quais se recomenda 80%, a direção e a

velocidade do voo. Automaticamente o software estimará o tempo necessário, o número de imagens a ser registradas e a quantidade de baterias (Figura 6). Sobre a altura do voo, há a possibilidade de verificar o perfil do terreno para configurar que o voo seja realizado acima de todos os obstáculos.

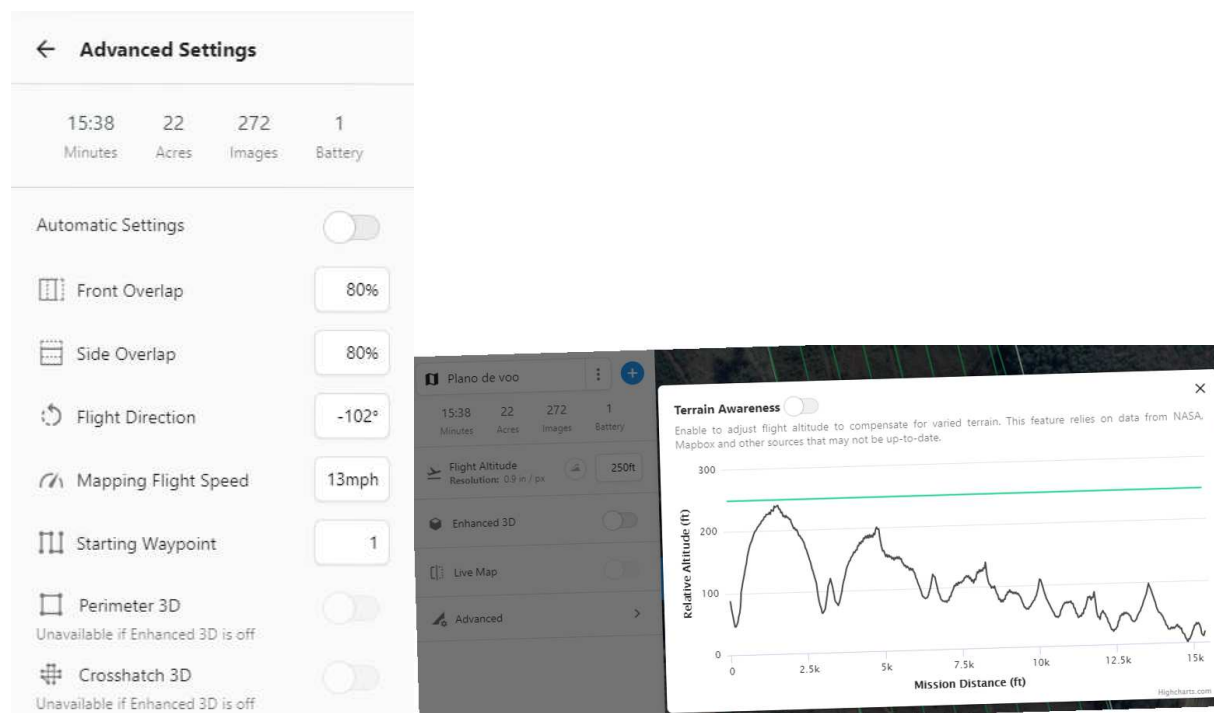


Figura 6: Interface inicial para criar o plano de voo no DroneDeploy, com ênfase nas configurações avançadas.

Fonte: Autora (2021)

Para iniciar o voo em campo, é necessário contar com um *smartphone* ou *tablet*, baixando o aplicativo da marca do dispositivo (Figura 7 A) (normalmente DJIGo) e o DroneDeploy. Após realizado o *login* e com a rádio controle da aeronave conectada ao dispositivo (*smartphone* ou *tablet*), o botão “*Connect Drone*” estará habilitado, permitindo prosseguir para os próximos passos de *checklist* automático prévio ao voo (Figura 7 B). Quando todas as verificações estiverem de acordo, a aeronave decola automaticamente e o piloto só precisa monitorar as condições de segurança e o andamento do voo.

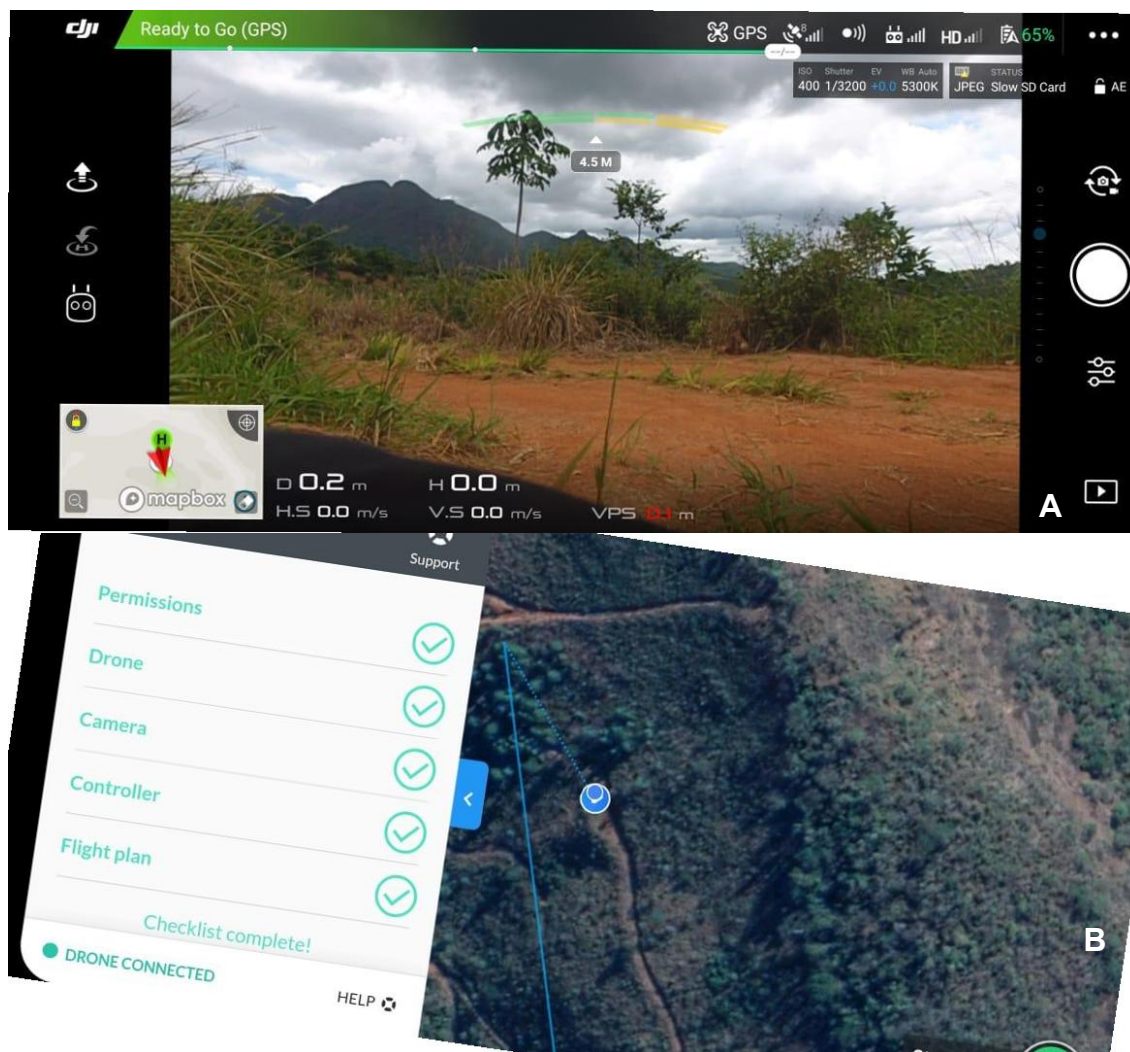


Figura 7: Exemplo das interfaces do aplicativo DJI Go indicando que a aeronave está pronta (A) e do DroneDeploy, onde será executado o plano de voo (B).
Fonte: Autora (2021)

2.8.2. Cuidados a serem tomados antes e durante a execução

Com base em orientações empíricas e nas experiências adquiridas realizando os sobrevoos com as RPA, seguem alguns cuidados que devem ser tomados para garantir a segurança do operador, de terceiros e da aeronave:

a) Antes da execução do voo, é importante procurar o ponto mais alto do relevo, pois a altura de voo será calculada a partir do local de onde a aeronave encontrar os satélites e decolar.

b) Caso não seja possível subir ao ponto mais alto, para garantir que a altura de voo planejada não representará em colisão com fragmentos florestais ou afins, a RPA

pode ser acionada de forma manual para subir até que se confirme a altura de segurança, replanejando a altura do voo pré-estabelecida caso seja necessário.

c) Deve-se procurar um local livre de obstáculos e preferencialmente, distante cerca de 30 metros de árvores de grande porte.

d) É necessário garantir que a aeronave está em perfeitas condições e com bateria suficiente, e altamente recomendável que a bateria não seja utilizada com cargas menores que 30%, para evitar sobreaquecimento

e) Quando a aeronave decolar, manter-se distante em pelo menos 5 metros.

f) Não se deve perder a aeronave de vista ou deixar de acompanhar o andamento do voo e os sinais de bateria.

2.8.3. Pontos de controle

As fotografias aéreas obtidas com os RPA possuem coordenadas geográficas que possibilitam gerar um mosaico georreferenciado, mas para aumentar a acurácia do ortomosaico produzido após o sobrevoo, podem ser determinados pontos de controle na superfície terrestre, que terão suas coordenadas geográficas obtidas com um sistema GNSS RTK/PPK ou estação total, servindo como apoio para a correção geométrica das imagens capturadas. Os pontos de apoio são alvo visíveis nas imagens aéreas e devem ser dispostos em local plano, com boa visibilidade (contraste e dimensões apropriadas dependendo da altura do voo) e afastados de objetos altos, de forma a possuírem boa visualização destes nas imagens registradas (Trindade & Nunes, 2018). Quanto mais pontos de controle forem instalados, e quanto mais bem distribuídos, melhor qualidade posicional da ortofoto gerada (Zanetti, 2017). Quando utilizados de maneira correta é possível atingir uma acurácia de 5 a 10 cm em X e Y e 10 a 15 cm em Z.

Os pontos de controle podem ser dispensados quando as aeronaves apresentam receptores GNSS de frequência L1/L2, pois permitem o pós-processamento PPK, facilitando o imageamento de áreas muito amplas ou de difícil acesso.

Uma opção para aumentar a precisão quando não é possível obter as coordenadas com um sistema GNSS RTK/PPK ou estação total, é coletar as coordenadas com um receptor GPS comum, aguardando cerca de 10 minutos no local

para que ocorra a correta triangulação de satélite, reduzindo o erro de localização do aparelho.

2.8.4. Processando as cenas

O processamento das cenas para criação de um ortomosaico retificado normalmente é realizado com auxílio de alguns softwares específicos, como o DroneDeploy, Pix4d e Agisoft Metashape, que são pagos e necessitam de licença para operação. Porém, o DroneDeploy apresenta uma versão demonstrativa gratuita por quinze dias, o que permite ao operador obter uma ideia de como funciona o aplicativo.

O funcionamento geral normalmente envolve o carregamento das cenas com 80% de sobreposição geradas a partir dos sobrevoos, a seleção do produto a ser exportado, o processamento automático que pode demorar alguns minutos até que este documento possa ser baixado.

2.8.5. Problemas de regulagem da câmera

Pode acontecer de haver problemas com a câmera das RPA (Figura 8), demonstrando que houve alguma desconfiguração no tempo de exposição, ISO, etc. Para resolver este problema, é possível encontrar as configurações da câmera do RPA, e restaurar as configurações originais.

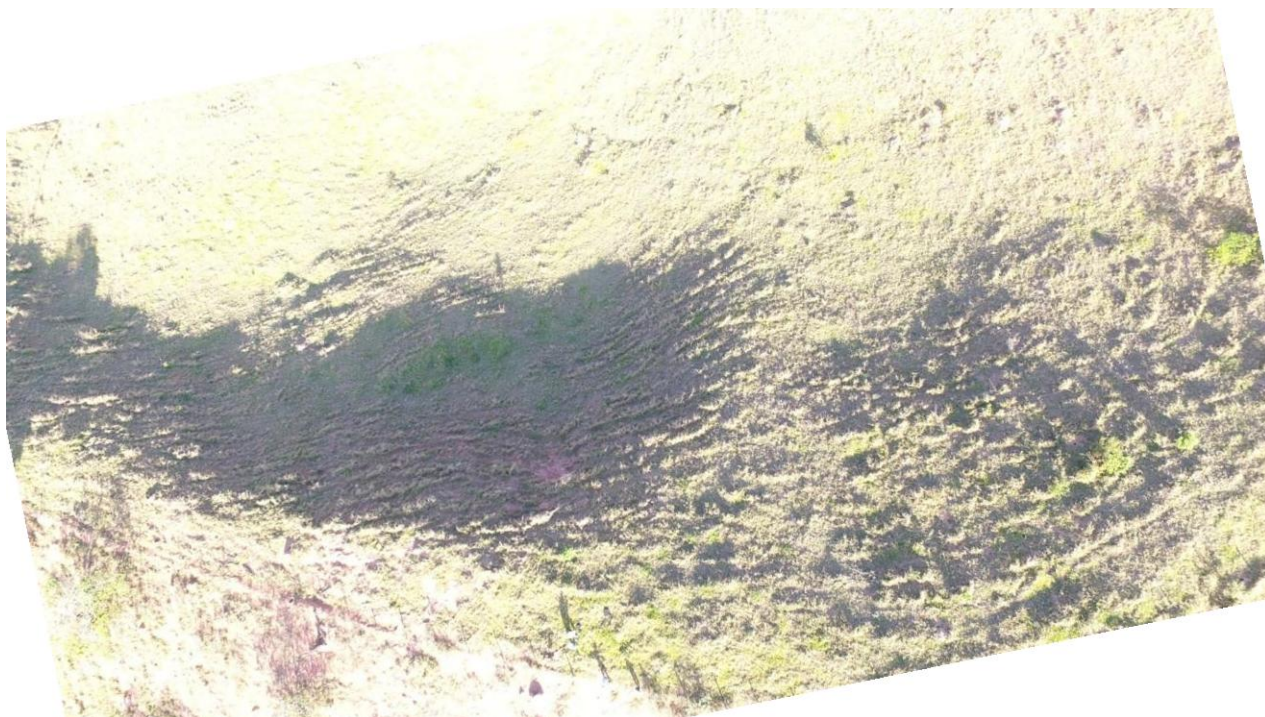


Figura 8: Exemplo de imagem obtida com a câmera desregulada.
Fonte: Autora (2021)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A segunda parte deste trabalho apresenta um estudo de caso com a aplicação de uma RPA no diagnóstico ambiental prévio e no monitoramento de áreas em restauração florestal na bacia hidrográfica do Rio Doce. A bacia apresenta como principal uso do solo no estado de Minas Gerais, as pastagens, que de forma geral, encontram-se extremamente degradadas, com baixa produtividade primária e com grandes porções de solos expostos, o que acaba ocasionando grandes erosões de solo, as quais evoluem de ravinas para voçorocas em poucos anos. Poucos são os fragmentos florestais, em geral degradados e localizados principalmente nas porções mais íngremes e de difícil acesso. Já na região da bacia no estado do Espírito Santo, a principal atividade agrícola é o cultivo de café e os fragmentos florestais recobrem maiores áreas ao longo da paisagem (INSTITUTOS LACTEC, 2017). A tipologia florestal da área estudada é a Florestal Estacional Semidecidual, que pertence ao Domínio Mata Atlântica (IBGE, 2006).

Para esta etapa utilizou-se uma aeronave DJI Phantom 4 Standart, equipada com uma câmera digital RGB de resolução de imagens igual a 12,4 megapixel e sensores GNSS multiconstelação (DJI, 2021). Ao longo de 2020 e início de 2021 foram realizados alguns sobrevoos automáticos, planejados no programa online DroneDeploy para a sobreposição de imagens, além de voos manuais. As alturas dos voos variaram entre 60 e 100 metros e a sobreposição entre 65% a 80%. Foram realizados voos sobre áreas de experimentos que estão em andamento, que abrangem a metodologia de Regeneração Natural Assistida e Plantio Total de Mudas (Tabela 1). A densidade de indivíduos foi estimada para as áreas de regeneração natural através de parcelas de 20 x 20 metros (400 m²), instaladas para avaliação dos experimentos. Estes experimentos de regeneração natural assistida foram implantados no médio Doce no município de Galileia, contendo ao todo 16 parcelas, e no baixo doce em Colatina com 12 parcelas avaliadas. No baixo Doce além da densidade, foram coletados os dados de cobertura vegetal com uma trena métrica de 25 metros disposta na diagonal das parcelas, onde quantificou-se a extensão da sobreposição de cada tipo da classe do uso do solo (arbustivo-arbórea, gramíneas, solo exposto). Após, foram calculadas as porcentagens de cobertura de cada uma dessas classes por parcela, obtendo-se a média aritmética final dos valores por parcela.

Tabela 1: Informações básicas sobre a configuração dos voos planejados no DroneDeploy para criação dos ortomosaicos de demonstração.

Dados/experimento	Regeneração Natural Assistida	Plantio de Mudas Agosto /2020	Plantio de Mudas Fevereiro /2021
Município	Colatina/ES	Colatina/ES	Colatina/ES
Data do voo	17/09/2020	12/08/2020	26/02/2021
Altura de voo	76,2 metros	76,2 metros	80 metros
Velocidade de voo	7,15 m/s	8,95 m/s	6,00 m/s
Nº de imagens	162	137	236
Taxa de Sobreposição	80% frontal e 80% lateral	75% frontal e 65% lateral	80% frontal e 80% lateral
Resolução	3,4 cm/pixel	3,4 cm/pixel	3,4 cm/pixel
Mapas de cobertura florestal criados com classificação supervisionada	- Uso do Solo - Índice de Vegetação MPRI - Índice de Vegetação SAVI adaptado L 0,5	- Índice de Vegetação MPRI - Índice de Vegetação SAVI adaptado L 0,5	- Índice de Vegetação MPRI - Índice de Vegetação SAVI adaptado L 0,5

Com as imagens com sobreposição obtidas a partir dos sobrevoos planejados foram construídos os ortomosaicos na versão teste da plataforma online do DroneDeploy, que também foi utilizada para obtenção dos modelos digitais de terreno. De posse dos ortomosaicos no formato *geotiff*, foram construídos mapas de uso do solo no Software ArcGis para a demonstração da avaliação da cobertura florestal utilizando classificação supervisionada. Esta ferramenta nos softwares de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permite indicar pontos de referência por meio de amostras das diferentes classes de uso do solo (Figura 9), e através da identificação dos padrões de resposta espectral dos elementos com o auxílio de algoritmos específicos, é gerado um mapa final com a classificação baseada na referência indicada (Meneses et al., 2012). Este processo foi realizado com a fotointerpretação dos ortomosaicos RGB e o algoritmo utilizado foi do “Vizinho Mais Próximo”, com diferentes quantidades de amostras para cada classe de uso do solo (Tabela 2).

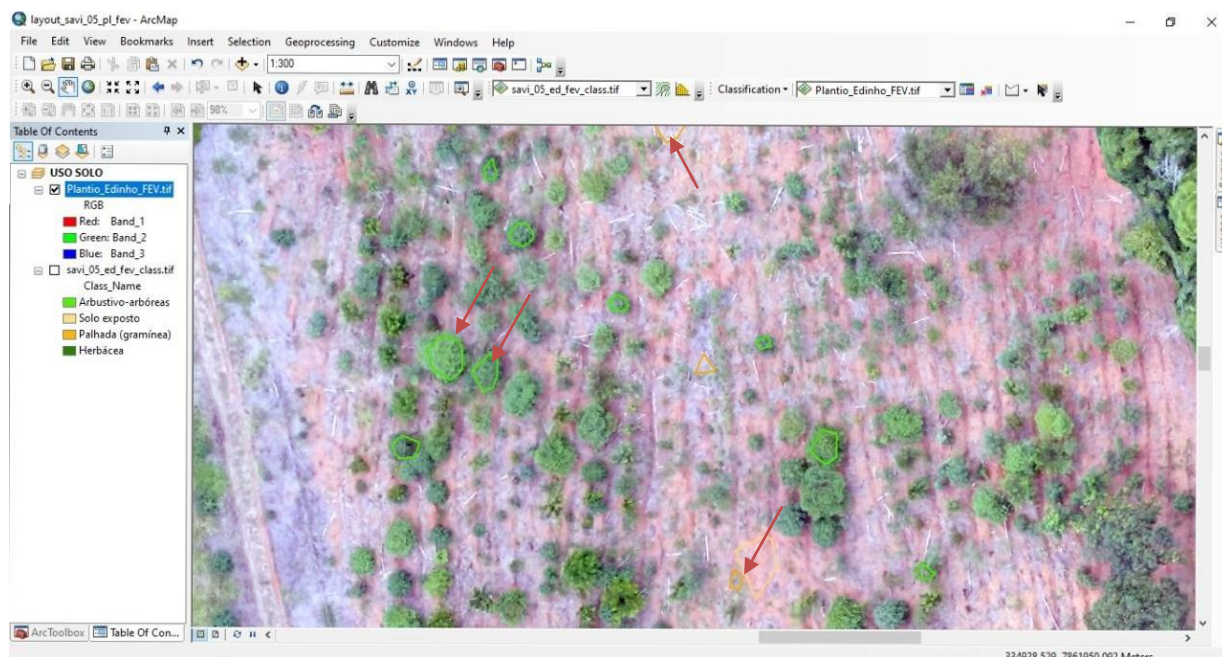


Figura 9: Demonstração das amostras para treinamento do algoritmo da classificação supervisionada no ArcGis.

Fonte: Autora (2021)

Tabela 2: Quantidade de amostras utilizadas para o treinamento da classificação supervisionada dos ortomosaicos das áreas de estudo, capturados em Agosto de 2020 e Fevereiro de 202, em Colatina/ES.

Regeneração Natural				Plantio de mudas	
Assistida					
Nº de amostras para treinamento do algoritmo					
Classe de uso do solo	Agosto de 2020	Agosto de 2020	Fevereiro de 2021		
Arbustivo-arbórea	27	29	35		
Palhada	NA	10	11		
Solo exposto	14	10	11		
Gramínea	14	18	NA		
Herbácea	NA	NA	12		

Além do mapa de classificação supervisionada, foram criados os mapas de índices de vegetação. Para isso, realizaram-se operações com as imagens *raster*, separando-as pelas diferentes bandas de reflectância (vermelho, verde ou azul). Com o software de SIG ArcGIS, realizaram-se os cálculos de álgebra de mapas conforme exposto no item 2.4 com as diferentes bandas de comprimento de onda visando formar uma nova imagem com os diferentes valores de índices para cada pixel.

Os índices de vegetação utilizados foram o MPRI – Índice de Refletância Fotoquímica Modificado (*Modified Photochemical Reflectance Index*) e o SAVI adaptado (*Vegetation Index Soil-Adjusted*) usando o fator 0,5 e SAVI adaptado usando o fator 0,25 (mais detalhes no item 2.4). Após, estes mapas de vegetação contendo os índices de vegetação para cada pixel também passaram pela classificação supervisionada utilizando as mesmas amostras de treinamento da etapa anterior. Para todos os tipos de mapas criados (Tabela 1), foi calculada a área ocupada por cada classe de uso do solo (Vegetação arbustiva-arbórea, vegetação herbácea, gramíneas, palhada, que representaram as gramíneas secas após aplicação de herbicida, e solo exposto).

Para a área de Regeneração Natural Assistida foram criados três mapas, sendo um de classificação supervisionada simples, um através da classificação do mapa de MPRI e outro da classificação do mapa de SAVI adaptado. Para a área de Plantio de Mudas, foram criados quatro mapas sendo dois com os índices de vegetação MPRI e

SAVI adaptado para o mês de agosto de 2020 e outros dois com estes mesmos índices para o mês de fevereiro de 2021 (Tabela 1).

4. RESULTADOS

4.1. CONTRIBUIÇÕES PARA O DIAGNÓSTICO AMBIENTAL

Para um diagnóstico ambiental é importante que seja feito um trabalho minucioso, conciliando análise da paisagem por imagens aéreas e verificação de campo. Isso exige imagens de alta resolução, preferencialmente igual ou menor que 2,5 m/pixel e com escala menor que 1:15.000 (Brancaion et al., 2015).

Com os ortomosaicos dos sobrevoos planejados ou até imagens individuais de voos manuais, é possível realizar as análises prévias para um bom diagnóstico ambiental. Serão demonstrados diferentes usos do solo com imagens já obtidas em campo com um RPA DJI Phantom 4, complementando com as imagens de câmera fotográfica da realidade de solo.

4.1.1. Obtenção de Modelo Digital do Terreno (MDT) e perfis de declividade

Uma necessidade quando se planeja a operação das ações de restauração florestal diz respeito ao conhecimento do perfil do terreno, para identificar locais que podem ser mecanizados com tratores de pneu, de esteira ou que não podem ser mecanizáveis. Essa identificação normalmente é baseada na declividade do terreno, e em geral, são necessários alguns levantamentos topográficos. Com auxílio dos sobrevoos com RPA e pós-processamento das imagens é possível criar Modelos Digitais de Terreno (MDT) (Figura 10), que podem informar mais rapidamente o comportamento do relevo e demarcar as áreas que poderão receber subsolagem.

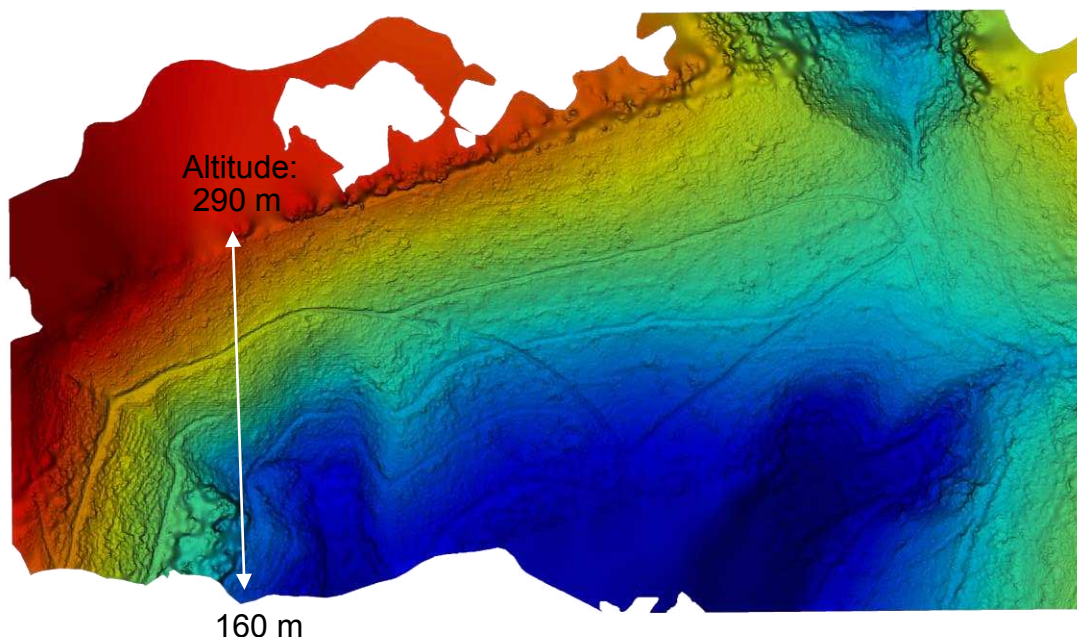


Figura 10: Exemplo de MDT gerado no software de pós-processamento DroneDeploy. Elaborado pela autora no DroneDeploy.
Fonte: Autora (2021)

4.1.2. Áreas que não possibilitam o aproveitamento inicial da regeneração natural

As áreas sem potencial de regeneração natural normalmente são aquelas onde os solos foram muito degradados, que se apresentam cobertos por gramíneas competidoras ou demais filtros ecológicos e sem expressão da regeneração natural (Brançalion et al., 2015; Chazdon, 2016). Para estes locais recomendam-se ações de restauração mais complexas, como isolamento dos fatores de degradação, controle de gramíneas e plantio de mudas do grupo de recobrimento e de diversidade (Brançalion et al., 2015).

Solos expostos são visíveis facilmente em função da tonalidade marrom, contrastando com o verde da vegetação. Áreas cobertas por espécies gramíneas são facilmente visualizadas através da homogeneidade da cobertura vegetal e do tom verde claro.

É possível realizar a fotointerpretação das ortoimagens capturadas com as RPA e identificar os locais onde há predomínio de gramíneas, com poucos indivíduos arbustivo-arbóreos (Figura 11).



Figura 11: Imagem aérea obtida com RPA em São Vitor, MG, indicando uma área de pastagem, com alguns pontos mais escuros representando a presença se algumas herbáceas e arbustos em meio a matriz de pasto. Fonte: Autora (2021)

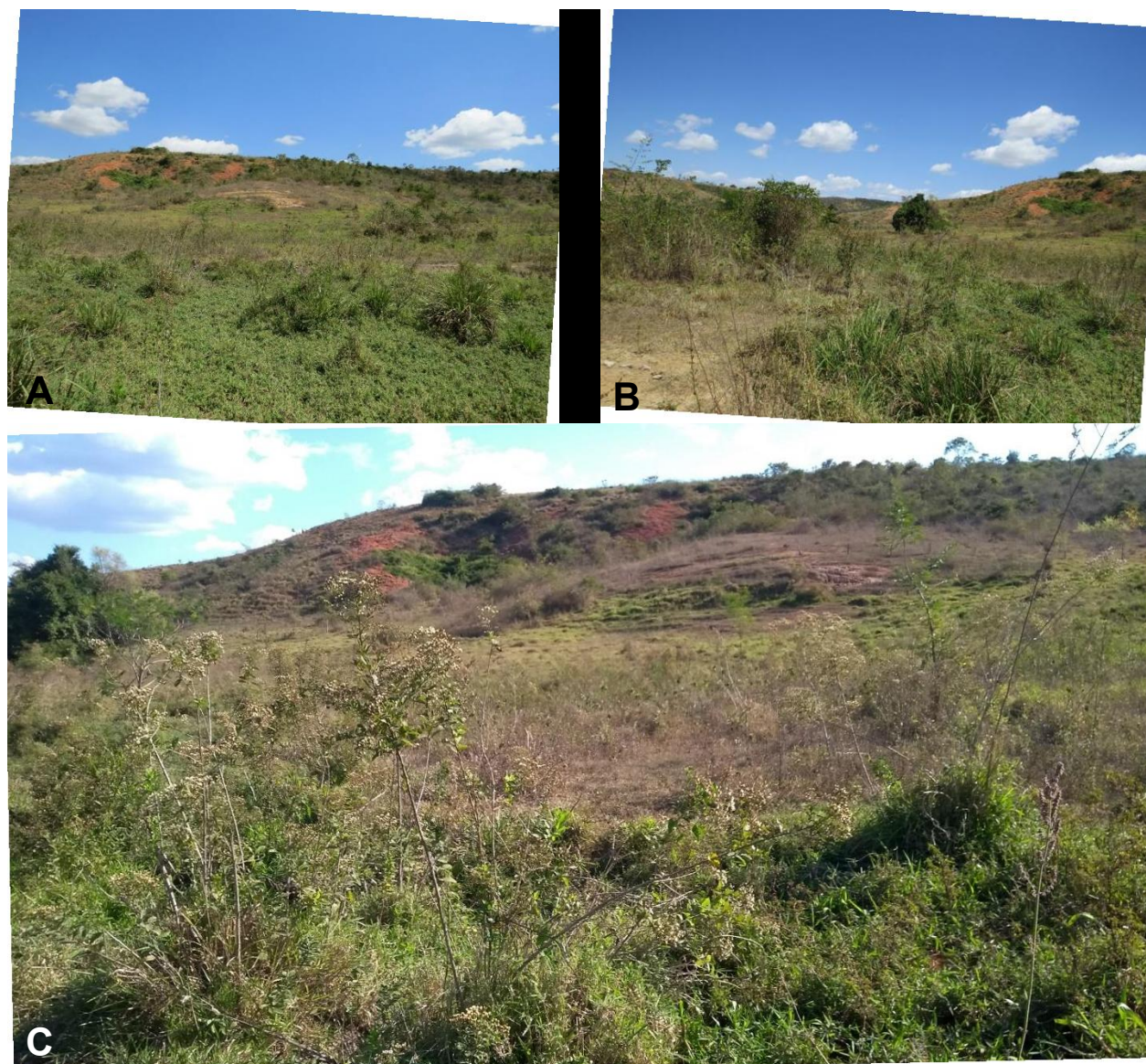


Figura 12: Imagens da realidade do campo demonstrando a presença de herbáceas e arbustos esparsos em meio a pastagem em São Vitor, MG, em densidade aproximada de 400 indivíduos/hectare da espécie arbustiva assa-peixe (*Vernonia* sp). Fonte: Autora (2021)

4.1.3. Áreas com médio e alto potencial de regeneração

O planejamento das ações de restauração requer o conhecimento do potencial de regeneração natural de cada área, das condições de solo, etc (Chazdon, 2016). Áreas com médio potencial de regeneração natural, além do contexto da paisagem no entorno, podem ser aquelas que apresentam em média de 800 a 1.600 indivíduos/ha, sendo contabilizados aqueles de espécies arbustivas e arbóreas (Figura 13 a Figura 20). Áreas

com alto potencial de regeneração são aquelas com densidade acima de 1.600 indivíduos arbustivo-arbóreos por hectare.



Figura 13: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, indicando uma área de médio potencial de regeneração natural, com densidade de espécies arbustivo-arbóreas de aproximadamente 1.000 ind./ha e com sub-bosque composto por gramíneas e herbáceas (a esquerda da linha tracejada) e após controle de gramíneas com roçada mecanizada e abertura de berços de plantio (a direita). Fonte: Autora (2021)



Figura 14: Imagens da realidade do campo de Galiléia, MG, demonstrando a presença de árvores esparsas com densidade de aproximadamente 1.000 ind./ha, demonstrando a esquerda da linha tracejada uma porção sem controle de gramíneas e a direita da linha tracejada a área com controle de gramíneas. Fonte: Autora (2021)



Figura 15: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, indicando uma área de médio potencial de regeneração natural, com densidade de espécies arbustivo-arbóreas de aproximadamente 1.100 ind./ha e com sub-bosque composto por gramíneas e espécies herbáceas. Fonte: Autora (2021)



Figura 16: Imagens da realidade do campo em Galiléia, MG, demonstrando a presença de árvores esparsas com densidade de aproximadamente 1.100 ind./ha, demonstrando o sub-bosque composto por gramíneas e herbáceas. Fonte: Autora (2021)



Figura 17: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, indicando uma área de médio potencial de regeneração natural, com densidade de espécies arbustivo-arbóreas de aproximadamente 1.100 a 1.600 ind./ha, com sub-bosque composto por espécies gramíneas. Fonte: Autora (2021)

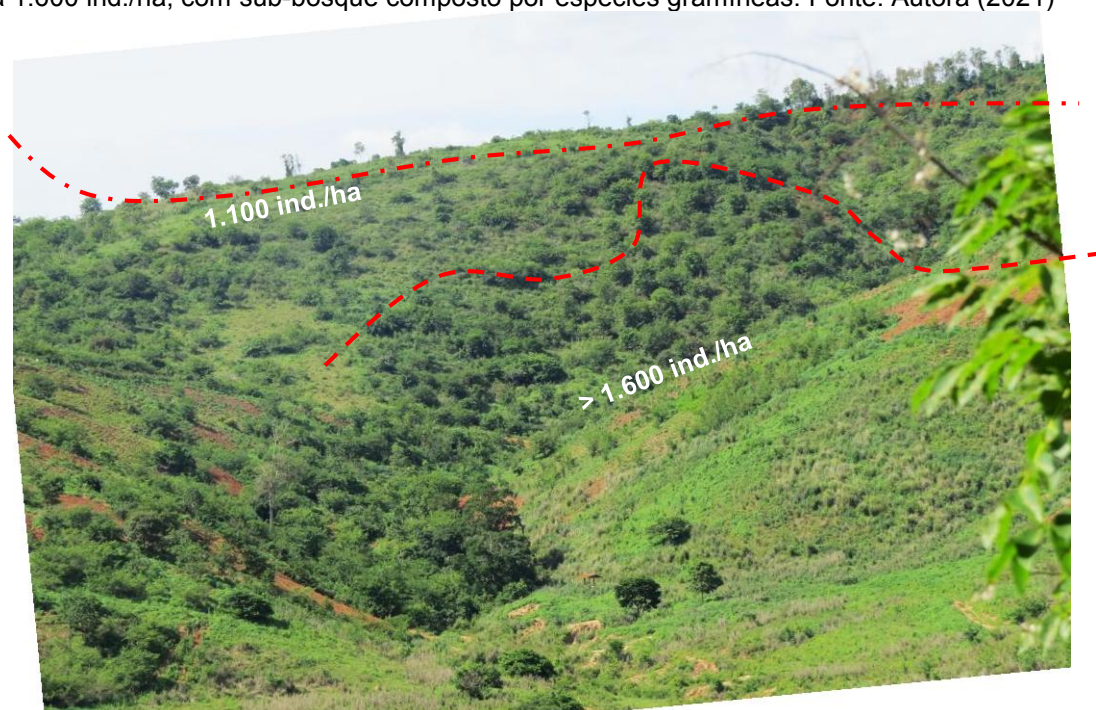


Figura 18: Imagens da realidade do campo em Galiléia, MG, demonstrando a porção de vegetação com aproximadamente 1.100 ind./ha e aquela com mais de 1.600 ind./ha. Fonte: Autora (2021)

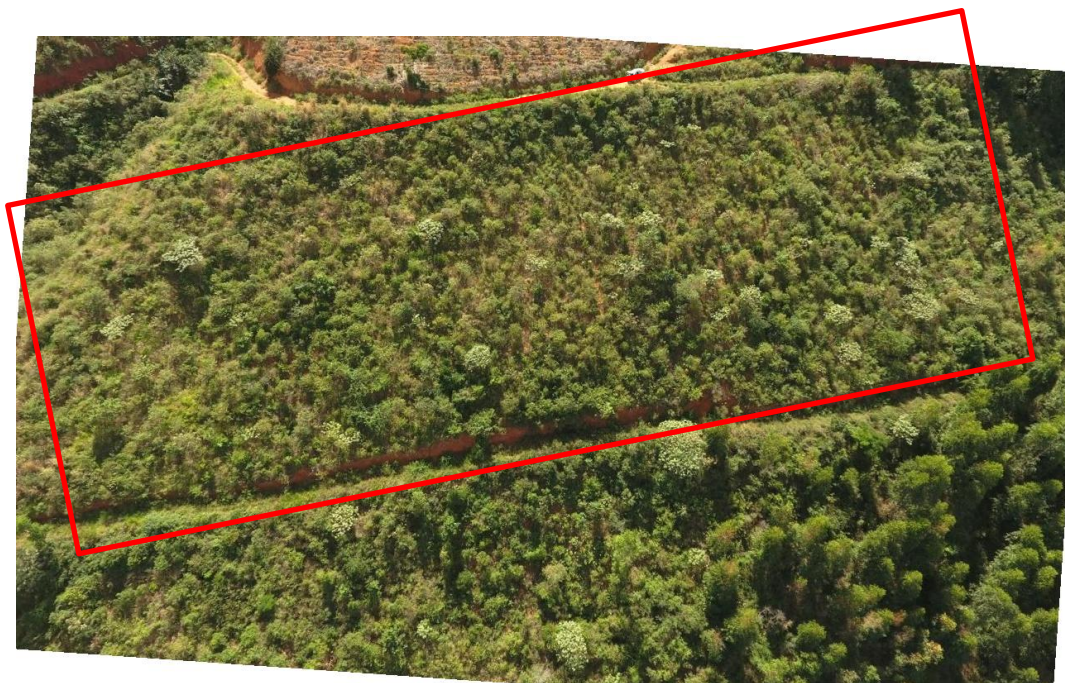


Figura 19: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Colatina, ES, indicando uma área de médio potencial de regeneração natural, após ter sido um talhão de eucalipto, com densidade de espécies arbustivo-arbóreas de aproximadamente 1.100 a 1.600 ind./ha, ocupada principalmente por assa-peixe (*Vernonia* sp).



Figura 20: Imagem da realidade do campo em Colatina, ES demonstrando a porção de vegetação com aproximadamente 1.100 a 1.600 ind/ha, ocupada principalmente por assa-peixe (*Vernonia* sp).
Fonte: Autora (2021)

4.1.4. Áreas com monodominância de uma espécie arbórea

A espécie florestal *Myracrodruon urundeuva* Fr. All., também conhecida como aroeira, apresenta diversas características ecológicas e utilitárias que a caracterizam como uma espécie “nobre” da flora brasileira. Porém, ela manifesta um comportamento monodominante em algumas regiões do estado de Minas Gerais, principalmente na região do médio rio Doce (De Oliveira et al., 2014, 2015).

Sob o seu dossel ocorrem diversos processos erosivos e o sub-bosque se caracteriza por pouca densidade e riqueza de regenerantes. Por isso, estas áreas normalmente são, ou deveriam ser, alvo de ações de restauração florestal. As manchas onde ocorre monodominância de aroeira são visíveis por meio de fotointerpretação, pois suas copas formam uma textura homogênea (Figura 21 e Figura 22).



Figura 21: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galileia, MG, em 16/01/2020, indicando uma área de monodominância de aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Fr. All.). Fonte: Autora (2021)



Figura 22: Imagem externa com RPA, de 16/01/2020 (A) do padrão de uma área de monodominância de aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Fr. All.), e imagens do interior dos povoamentos (B e C), de 29/10/2019. Fonte: Autora (2021)

O mesmo padrão pode ser observado para áreas de silvicultura de *Eucalyptus* sp ou *Pinus* sp.

4.1.5. Áreas de floresta em estágio inicial de regeneração

As florestas em estágio inicial são basicamente aquelas compostas por uma vegetação lenhosa, com um único estrato formado por espécies de arbustos e árvores entre 6,0 a 8,0 metros de altura (Chazdon, 2016). A legislação ambiental brasileira,

através de Resoluções do Conama, também define alguns parâmetros a serem observados para a classificação de florestas em estágio inicial. No caso de Minas Gerais se aplica a Resolução Conama nº 392/2007, que define os seguintes parâmetros: ausência de estratificação definida, vegetação formando um único estrato (emaranhado) com altura de até 3 (três) metros; espécies lenhosas com distribuição diamétrica de pequena amplitude com Diâmetro à Altura do Peito (DAP) médio de até 8 (oito) centímetros; espécies pioneiras abundantes e trepadeiras geralmente herbáceas. A Figura 23, obtida por meio do RPA foi obtida de uma floresta com estas características, como pode ser mais bem observado nas imagens da Figura 24.

A distinção entre elas e florestas em estágio médio de regeneração apresenta maior complexidade do que áreas de pastagens e de florestas, portanto, ressalta-se que a avaliação por meio da fotointerpretação não exime a necessidade de verificação dos parâmetros em campo.



Figura 23: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, em 16/01/2020, indicando uma possível floresta em estágio inicial. Fonte: Autora (2021)



Figura 24: Imagem externa com câmera digital em 16/01/2020 (A) do padrão de uma possível floresta em estágio inicial em Galiléia/MG, e imagens demonstrando a homogeneidade de espécies e estrato arbustivo-arbóreo (B e C). Fonte: Autora (2021)

4.1.6. Áreas com processos erosivos

As áreas com processos erosivos são facilmente visualizadas nas imagens capturadas pelos RPA, pois se caracterizam como manchas lineares de tonalidades mais escuras em meio a vegetação ou solo exposto (Figura 25 e Figura 26).

No diagnóstico ambiental, ou até mesmo no monitoramento após as ações de restauração pode ser de interesse do restaurador o conhecimento da presença ou não

destes processos erosivos, como a quantificação do nº de ocorrências ou da área em m². Neste caso, é possível realizar uma classificação supervisionada de uso do solo, indicando para a ferramenta de SIG algumas áreas de erosão que servirão como amostras. Com base no padrão dos valores de reflectância, os algoritmos dos softwares farão a classificação desses locais, sendo possível obter a área final das porções contendo processos erosivos.



Figura 25: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Periquito, MG, demonstrando a presença de processos erosivos (dentro dos polígonos vermelhos) nas áreas de interesse. Fonte: Autora (2021)



Figura 26 Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Periquito, MG, demonstrando a presença de processos erosivos nas áreas de interesse. Fonte: Autora (2021)

4.2. PROCEDIMENTOS PARA MONITORAMENTO ECOLÓGICO

4.2.1. Contagem de berços abertos/coroamento

Uma necessidade da gestão das ações de restauração florestal pode ser a fiscalização das empresas executoras. Entre as etapas de fiscalização para posteriores pagamentos está a contagem de berços abertos ou coroamento no entorno de mudas. Este procedimento normalmente é realizado com uma ida a campo e caminhada por toda a extensão plantada contabilizando os berços abertos ou coroamentos realizados. Quando as áreas são maiores ou de difícil acesso, um RPA pode contribuir dando agilidade ao processo, uma vez que os fiscais podem realizar o sobrevoo de várias áreas em um dia de campo, com pós-processamento dos dados em escritório.

Existem formas de contagem automáticas, porém elas demandam maior conhecimento de técnicas de SIG e classificação supervisionada, e podem ocorrer erros

nesta classificação, pois o solo do berço aberto é muito semelhante ao solo exposto do entorno.

Então, é possível criar um arquivo *shapefile* de pontos, e manualmente realizar este processo de seleção dos pontos onde foi realizada a abertura dos berços (Figura 27) ou a roçada de coroamento das mudas (Figura 28), que posteriormente podem ser contabilizados de forma automática.



Figura 27: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, onde é possível visualizar a contagem dos berços abertos para a restauração florestal. Fonte: Autora (2021)



Figura 28: Imagem aérea obtida com RPA Phantom 4 em Galiléia, MG, onde é possível visualizar a contagem das porções roçadas para coroamento (setas) de mudas para a restauração florestal. Fonte: Autora (2021)

4.2.2. Avaliação da cobertura florestal

A avaliação da cobertura florestal após adotadas as ações de restauração florestal pode ser realizada com o auxílio dos índices de vegetação (NDVI, MPRI ou SAVI adaptado), ou assim como os tópicos anteriores, com a classificação supervisionada da imagem natural.

Por isso, devem ser realizados sobrevoos constantes, preferencialmente nas mesmas configurações de voo (altura, sobreposição, ângulo de voo, etc.). Ou seja, devem ser realizados voos imediatamente após a implantação das ações de restauração florestal para obter as condições iniciais, e voos posteriores para acompanhar o crescimento da vegetação.

A cobertura florestal pode ser acompanhada por meio da classificação supervisionada de uso do solo em algum software de SIG, ou utilizando-se as álgebras de mapas para criação de índices e classificações de acordo com os valores destes. Após esta etapa, é possível quantificar a área ocupada por cada classe, sendo que após algum

período de tempo, espera-se que as classes contendo a vegetação arbustiva-arbórea aumentem (Figura 29 a Figura 33)

Se os índices utilizados forem o NDVI e o MPRI, os valores dos pixels podem variar de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior o vigor da vegetação, e possivelmente, maior a biomassa vegetal (representando que estes pixels são constituídos por arbustos ou árvores). Valores baixos, ou próximos de -1, indicam solo exposto. Assim, após criada a imagem com os índices, aplica-se uma nova classificação supervisionada das imagens contendo os índices espectrais com o mesmo conjunto de amostras de treinamento utilizados para classificar o uso do solo, gerando mapas como as das figuras Figura 29 e Figura 30.

Este procedimento pode ser realizado tanto em plantios de mudas ou sementes em área total para acompanhamento das mudas/sementes, como nas áreas de Regeneração Natural Assistida, visando acompanhar o desenvolvimento da vegetação. Esta ferramenta também pode ser utilizada para o diagnóstico prévio, pois permite identificar as áreas de falhas na regeneração natural e dimensionar os locais e quantidade de insumos onde deve ser realizado o adensamento com mudas do grupo funcional de recobrimento (Brancalion et al., 2015). A escolha do melhor índice ou metodologia de classificação pode variar, e para calibração dos resultados é importante que seja realizado um levantamento prévio em campo (Figura 35 a Figura 38).

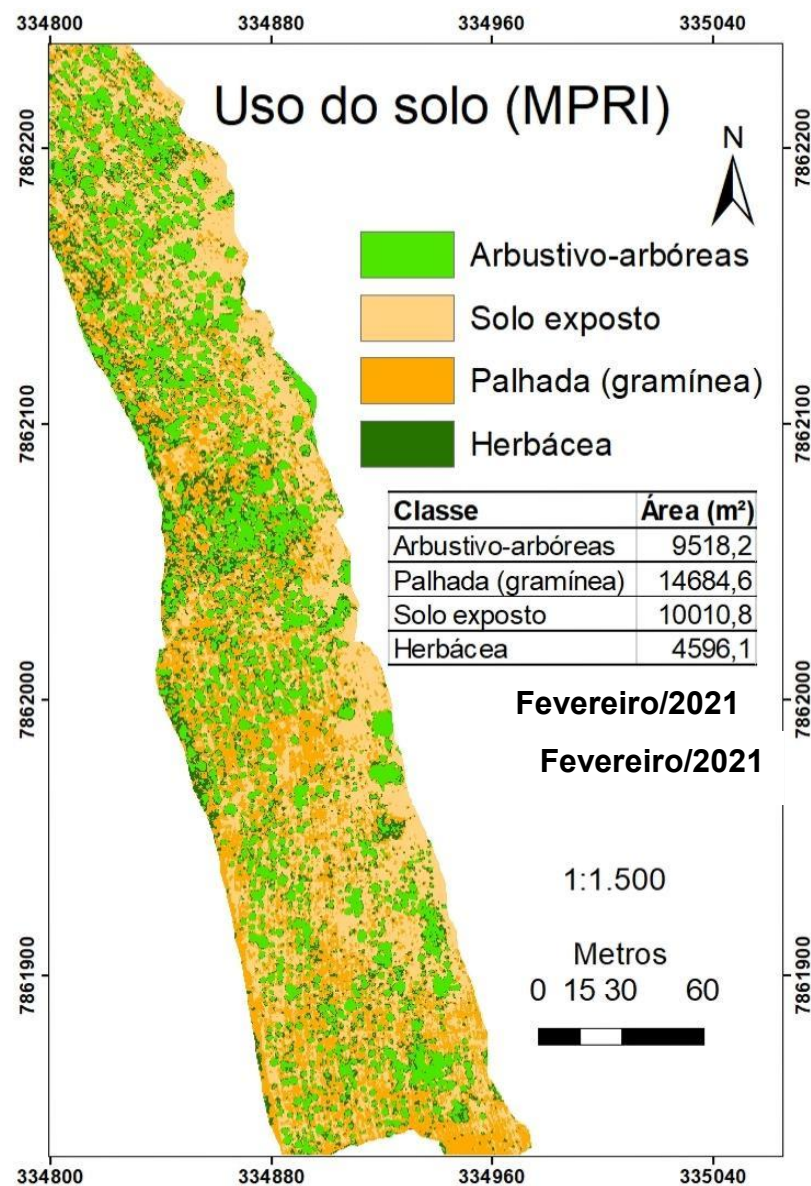
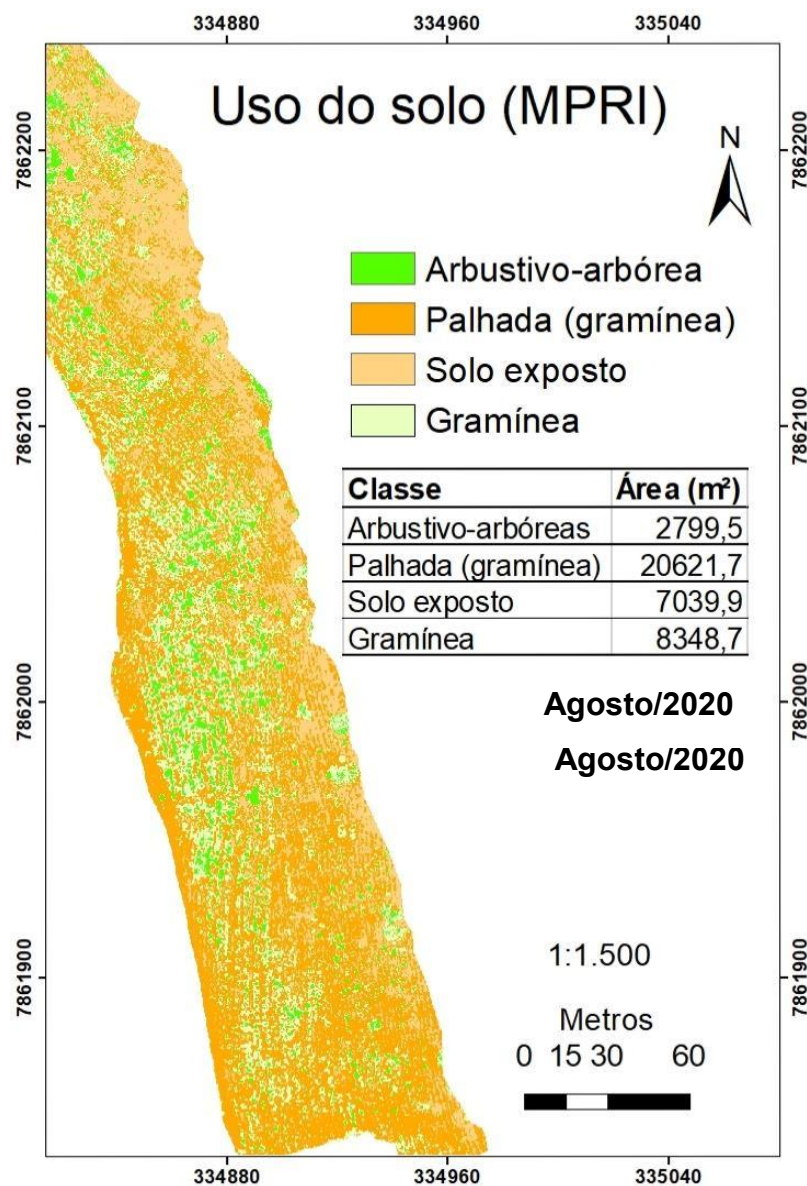


Figura 29: Aplicação do índice MPRI sobre imagens de um sobrevoo de RPA Phantom 4 sobre um plantio de restauração florestal, capturadas em agosto de 2020 (esquerda) e fevereiro de 2021 (direita), em Colatina, ES. Fonte: Autora (2021)

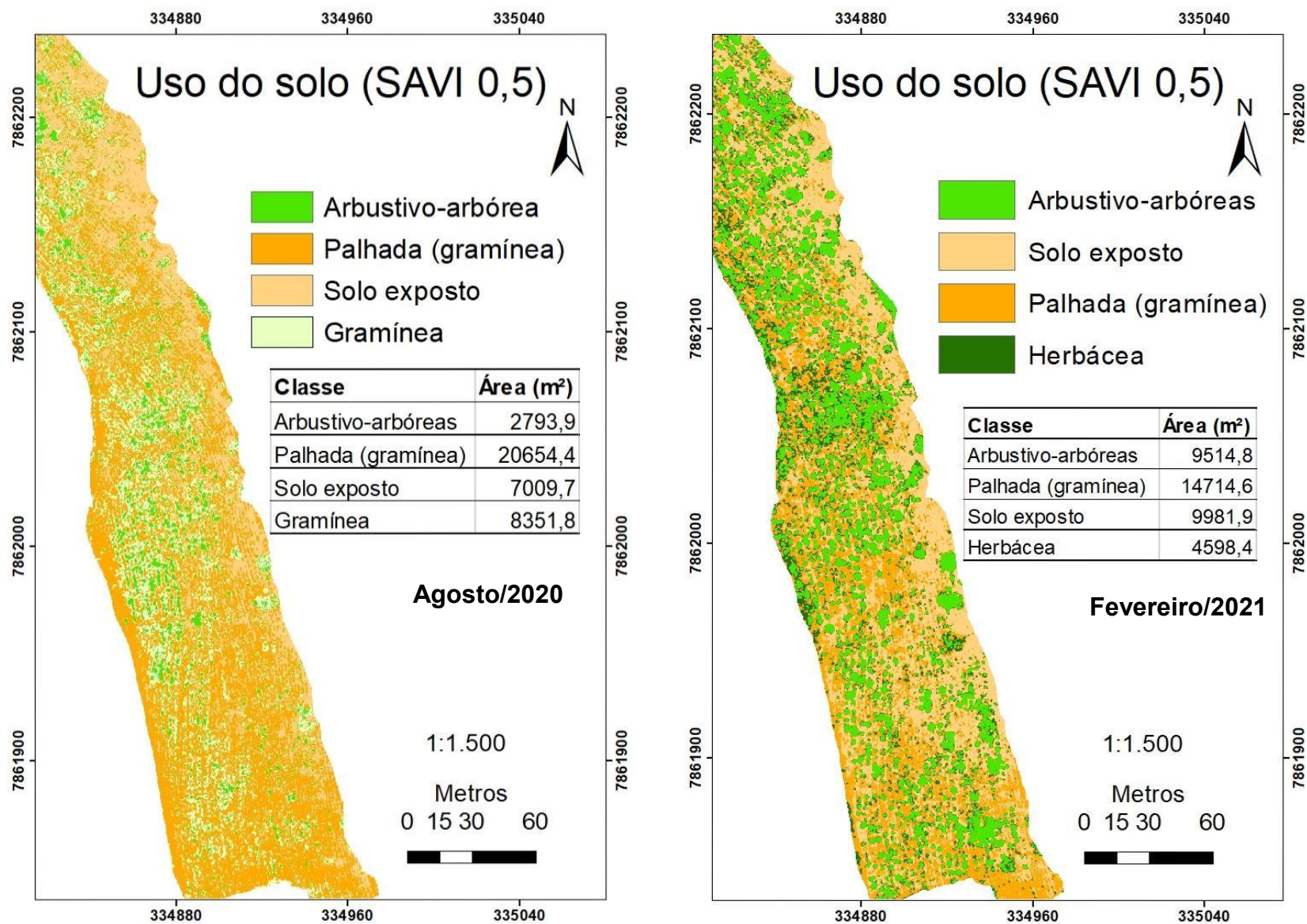


Figura 30: Aplicação do índice SAVI adaptado (com $L = 0,5$) sobre imagens de um sobrevoo de RPA Phantom 4 sobre um plantio de restauração florestal, capturadas em agosto de 2020 (esquerda) e fevereiro de 2021 (direita). Fonte: Autora (2021)

Na área de plantio de mudas no município de Colatina, ES, observou-se que não houve diferenças nas estimativas do percentual de cobertura florestal entre as metodologias de classificação supervisionada dos mapas dos índices de vegetação MPRI e SAVI adaptado (Tabela 3). No entanto, foi possível identificar um aumento de 17% na cobertura florestal (arbustivo-arbórea) e redução de 37% nas gramíneas vivas (- 22%) e nas secas (-15%) entre os meses de agosto de 2020 e fevereiro de 2021. Houve aumento de 8% no solo exposto, mas provavelmente em função da aplicação do herbicida para o controle das gramíneas, que será compensado pelo aumento na cobertura florestal.

Tabela 3: Quantitativos da avaliação da cobertura florestal pela classificação supervisionada dos mapas dos índices de vegetação MPRI e SAVI adaptado de uma área de plantio de mudas em Colatina, ES.

Classe de uso do solo	MPRI		SAVI adaptado (L=0,5)		
	% Agosto/2020	% Fevereiro/2020	% Agosto/2020	% Fevereiro/2020	% Transição
Arbustivo-arbórea	7%	25%	7%	25%	17%
Palhada (gramínea seca)	53%	38%	53%	38%	-15%
Solo exposto	18%	26%	18%	26%	8%
Gramínea	22%	0%	22%	0%	-22%
Herbácea	0%	12%	0%	12%	12%
Total	100%	100%	100%	100%	0%

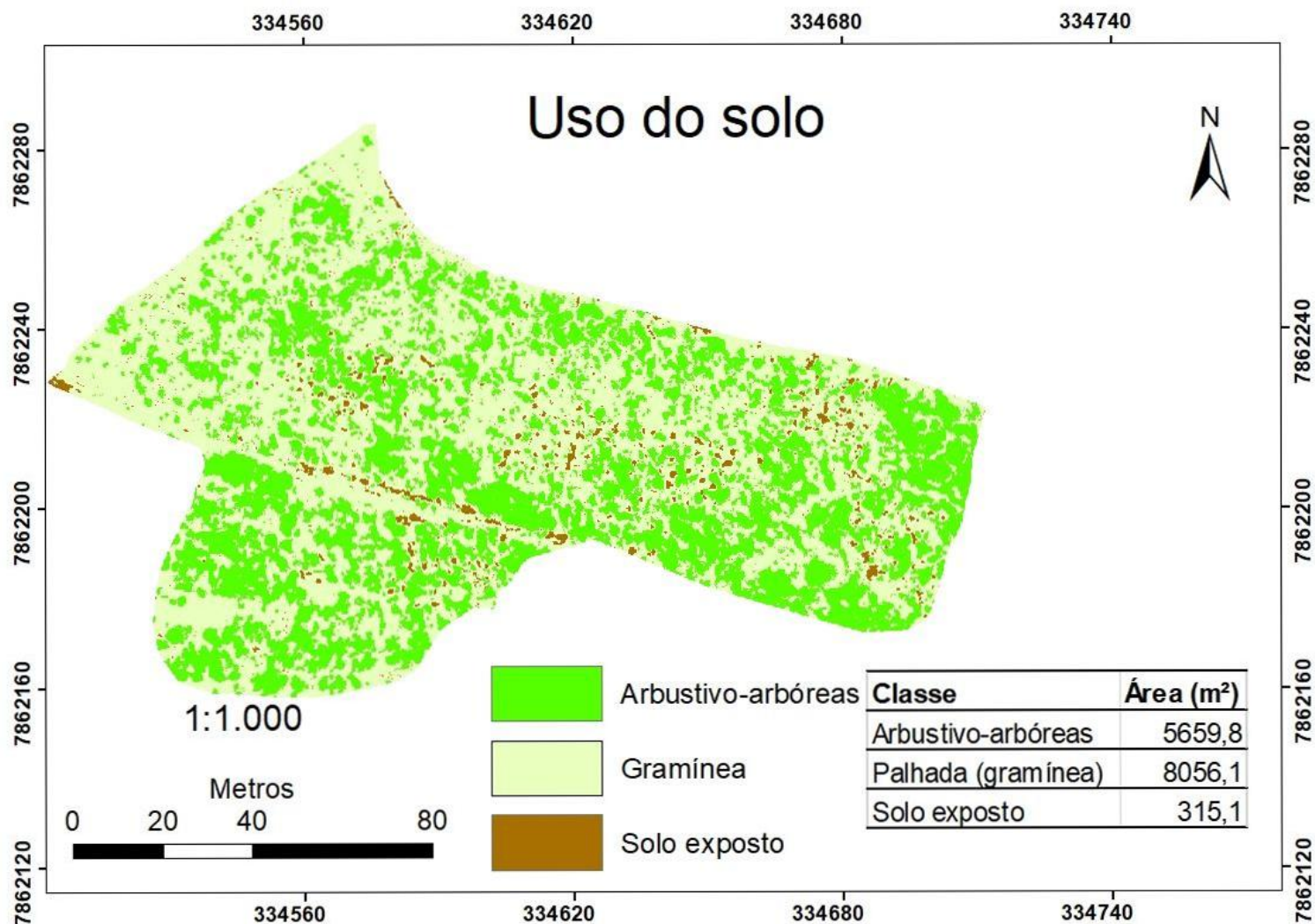


Figura 31: Classificação supervisionada de um ortomosaico produzido por sobrevoo de RPA Phantom 4 sobre uma área em restauração florestal pelo método de Regeneração Natural Assistida, realizado em setembro de 2020 no município de Colatina, ES, Baixo Doce. Fonte: Autora (2021)

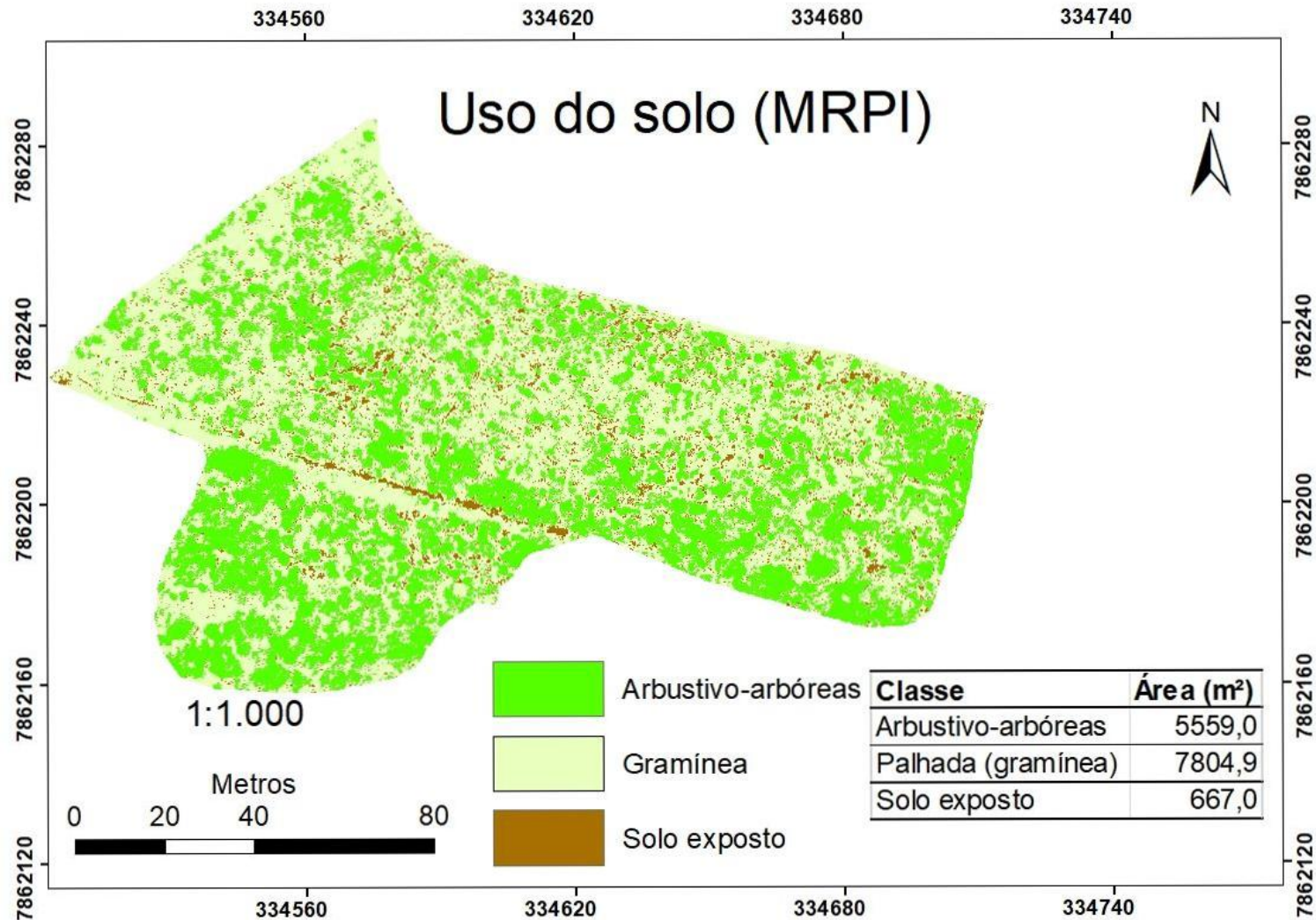


Figura 32: Aplicação do índice MPRI sobre imagens de um sobrevoo de RPA Phantom 4 sobre uma área em restauração florestal pelo método de Regeneração Natural Assistida, capturadas em agosto de 2020 no município de Colatina, ES, Baixo Doce. Fonte: Autora (2021)

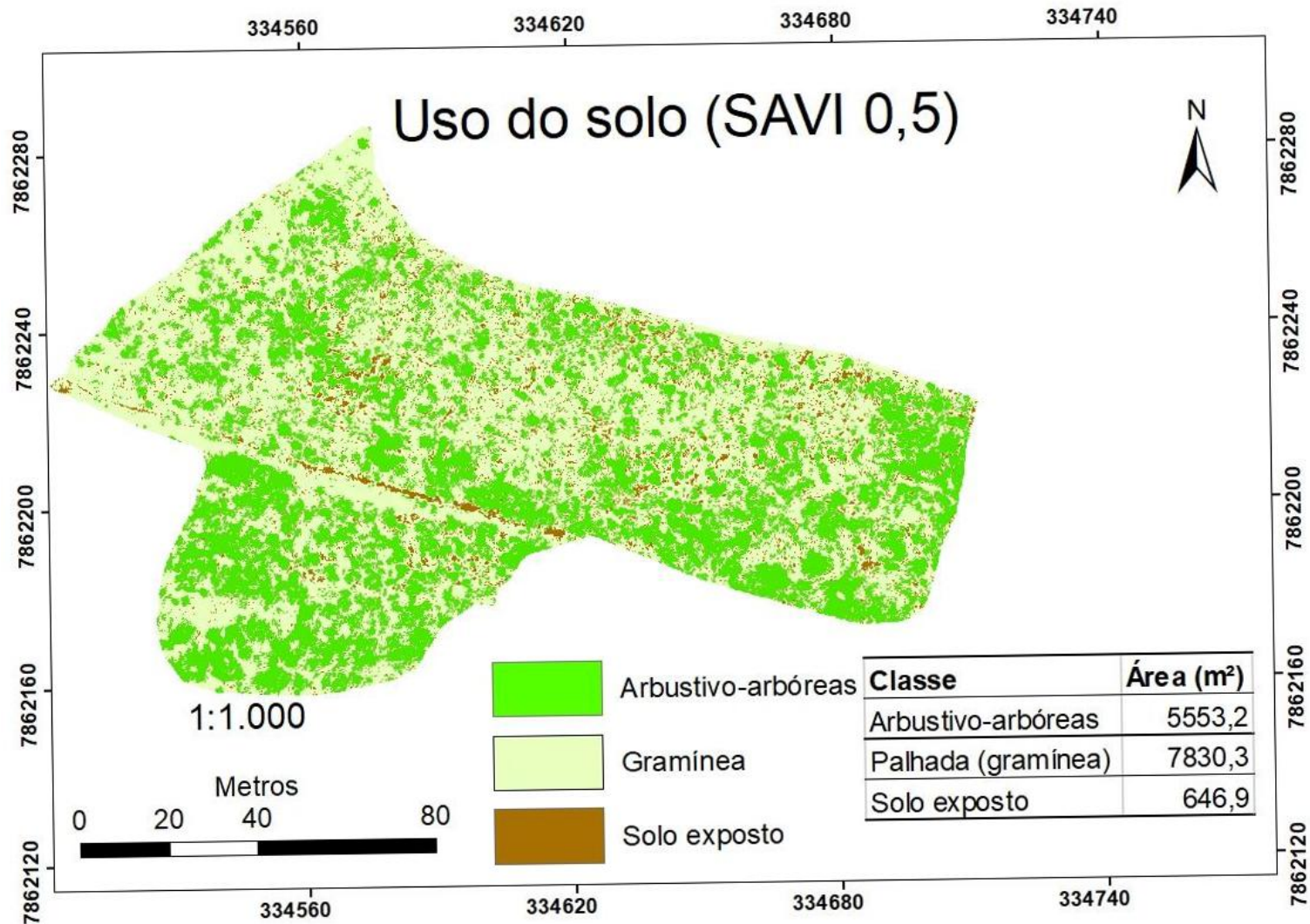


Figura 33: Aplicação do índice SAVI adaptado (com $L = 0,5$) sobre imagens de um sobrevoo de RPA Phantom 4 sobre uma área em restauração florestal pelo método de Regeneração Natural Assistida, capturadas em agosto de 2020 no município de Colatina, ES, Baixo Doce. Fonte: Autora (2021)

As áreas calculadas através das classificações supervisionadas, independente do mapa de base, demonstraram semelhanças na estimativa da cobertura de árvores e arbustos, que resultou em cerca de 40% da área total (Figura 34). A estimativa para as gramíneas e solo exposto apresentou distorções dos valores obtidos por sensoriamento remoto em relação aos dados de campo, porém tais diferenças podem ser devidas às interpretações diferentes dos operadores e à distribuição das parcelas, uma vez que entre as metodologias remotas as variações foram mínimas (Figura 34).

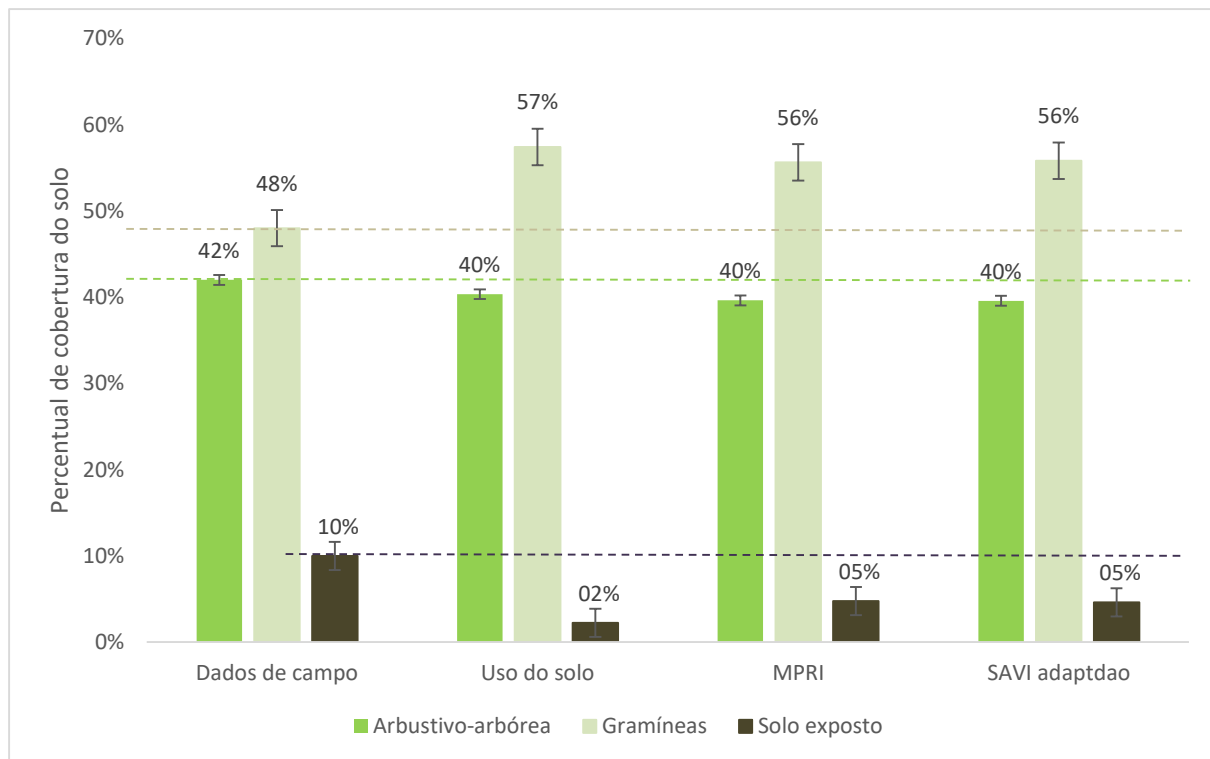


Figura 34: Gráfico demonstrando a variação entre os percentuais de cobertura de solo dados pelas diferentes metodologias de avaliação.

(Legenda: Dados de campo representam a metodologia de avaliação da cobertura florestal com trena métrica; Uso do solo é o mapa criado com a classificação supervisionada pela fotointerpretação do ortomosaico em RGB, e MPRI e SAVI adaptado foram obtidos a partir da classificação supervisionada dos mapas de índices de vegetação). Fonte: Autora (2021)

4.2.3. Presença de gramíneas ou aplicação de herbicida

Normalmente, as espécies mais indesejadas na restauração florestal são as gramíneas exóticas que formam as pastagens, pois apresentam diferentes mecanismos de alelopatia que inibem o crescimento de espécies nativas, além de formarem uma

camada espessa que causa sombreamento excessivo, impedindo a germinação de sementes e/ou o desenvolvimento de espécies nativas menos tolerantes à sombra (NBL & TNC, 2013).

As imagens obtidas pelas RPA (Figura 35 a Figura 38) possibilitam facilmente a identificação dos locais com presença de gramíneas em função da sua tonalidade verde claro, e textura homogênea.



Figura 35: Imagem aérea obtida em fevereiro de 2021 com um RPA Phantom 4 em Colatina, ES (Baixo Doce), indicando a esquerda da linha tracejada um plantio total de mudas com aplicação de herbicida e subsolagem, e a direita da linha tracejada uma área de plantio sem controle químico das gramíneas do gênero *Urochloa* (braquiária), nem roçada. Fonte: Autora (2021)



Figura 36: Imagem aérea obtida em fevereiro de 2021 com um RPA Phantom 4 em Colatina, ES (Baixo Doce), indicando a esquerda da linha tracejada um plantio total de mudas com aplicação de herbicida e subsolagem, e a direita da linha tracejada uma área de plantio sem controle químico das gramíneas do gênero *Urochloa* (braquiária), nem roçada. Fonte: Autora (2021)



Figura 37: Imagem aérea obtida em setembro de 2020 com um RPA Phantom 4 no município de Marilândia, ES (Baixo Doce), indicando uma área de médio potencial de regeneração natural, com densidade de espécies arbustivo-arbóreas de aproximadamente 1.000 ind./há, após controle químico das gramíneas do gênero *Urochloa* (braquiária). Fonte: Autora (2021)



Figura 38: Imagens da realidade do campo da imagem área acima (Marilândia/ES), demonstrando a presença de gramíneas do gênero *Urochloa* (braquiária) antes do controle químico das gramíneas (A) e após o controle com aplicação de herbicida (B). Fonte: Autora (2021)

4.2.4. Avaliação das falhas de plantio

Outra aplicação passível das RPA é a avaliação da ocorrência de falhas de plantio (Figura 39), alta incidência de mortalidade ou distribuição irregular das espécies de recobrimento e diversidade (NBL & TNC, 2013), o que permite o planejamento do replantio e das estratégias de manejo adaptativo (Durigan & Ramos, 2013).

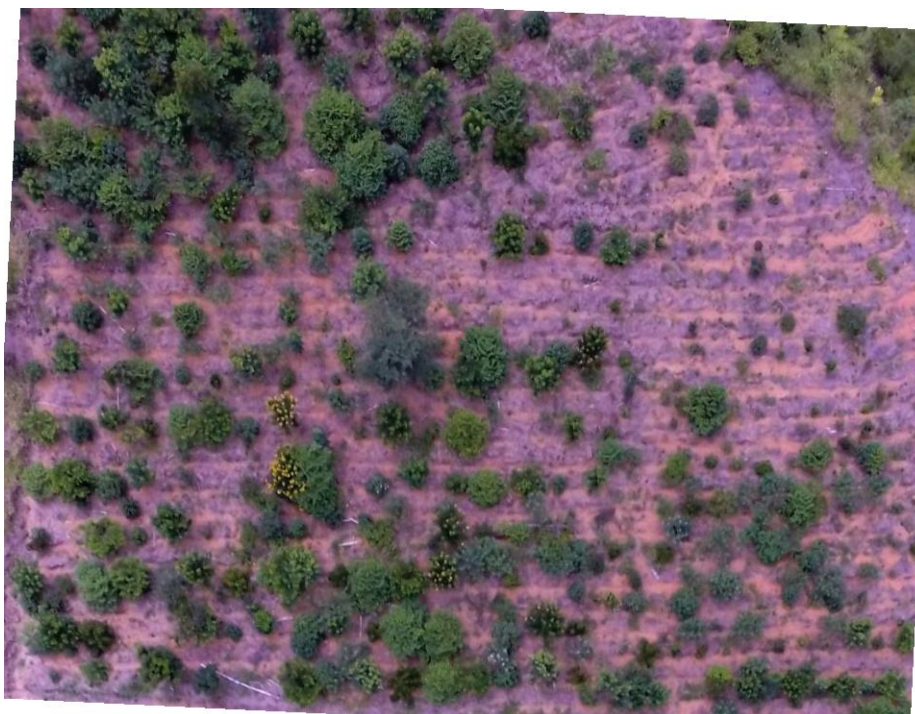


Figura 39: Imagem aérea obtida em fevereiro de 2021 com um RPA Phantom 4 no município de Colatina, ES (Baixo Doce), demonstrando a possibilidade de identificar as falhas de plantio após o crescimento inicial das mudas. Fonte: Autora (2021)

4.2.5. Avaliação da altura do dossel

Como explicado anteriormente, os modelos digitais de terreno (MDT) e os modelos digitais de superfície (MDS) são criados a partir da nuvem de pontos extraída das diversas imagens do sobrevoo, sendo que o MDT representaria o terreno sem nenhuma cobertura e o MDS o que se encontra na superfície deste terreno (Figura 40). Mesmo quando o levantamento não é realizado a laser, as RPA integrados apenas com câmeras RGB possibilitam a criação de MDT's e MDS's com softwares de pós-processamento de imagens, como o DroneDeploy e Pix4D, por exemplo.

Por isso, recomenda-se que sejam realizados levantamentos das áreas imediatamente após a implantação das ações de restauração, para que sejam obtidos os modelos digitais de terreno, e com o tempo, acompanhar o crescimento da vegetação através da subtração do MDS pelo MDT inicial (Figura 41). Este processo pode ser realizado com os softwares de SIG, utilizando as ferramentas de cálculo semelhantes a criação dos índices. Serão gerados novos mapas com as informações das alturas médias de cada pixel.

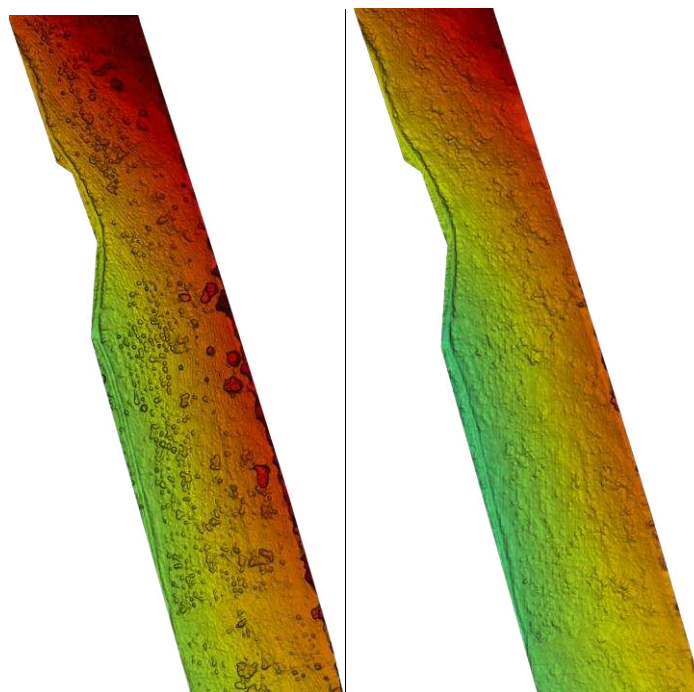


Figura 40: Exemplo de um trecho de MDS (esquerda) e de um MDT (direita) obtidos após pós-processamento no DroneDeploy das imagens obtidas por uma RPA Phantom 4 em fevereiro de 2021 em Colatina/ES, Baixo Doce. Fonte: Autora (2021)

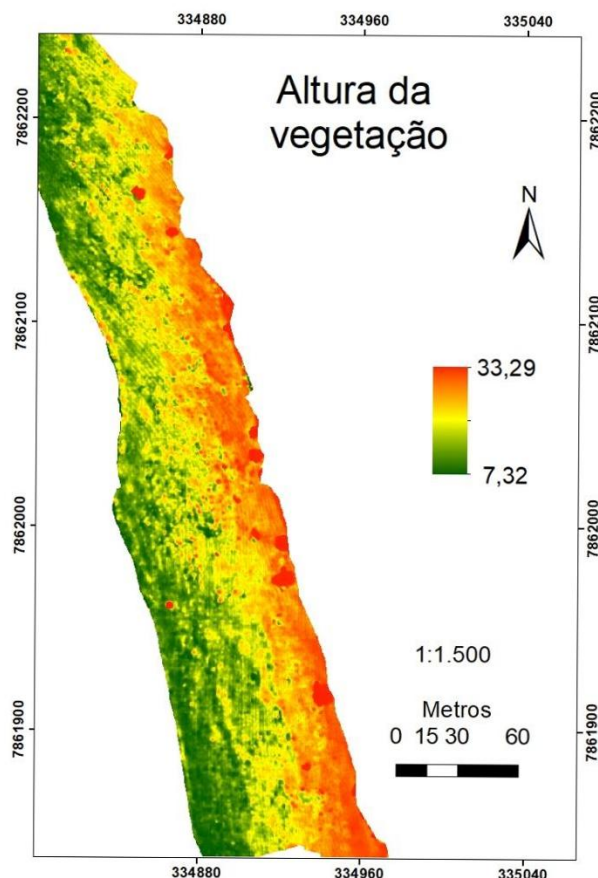


Figura 41: Mapa de altura do dossel, realizado com a subtração de um MDS pelo MDT em software SIG. Fonte: Autora (2021)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Abordamos aqui informações básicas para contribuir com aqueles profissionais que estejam iniciando a operação das aeronaves remotamente pilotadas nos seus trabalhos de restauração florestal.

Certamente existe uma série de possibilidades extras, e até de situações ambientais variadas que não foram abordadas neste documento, porém espera-se que os exemplos demonstrados possam servir de base para a fotorinterpretação e análise de outras situações.

Existem limitações quanto a utilização de RPA para a restauração florestal quando comparada com a silvicultura ou a agricultura de precisão, pois na restauração podem ser aplicados diversos métodos, assim como utilizadas diversas espécies, dificultando algumas aplicações como contagem automática de mudas plantadas, por exemplo.

Fato é que a restauração florestal tem sido cada vez mais demandada e apesar das limitações, a utilização do sensoriamento remoto e RPA se faz cada mais necessária para facilitar e aprimorar o levantamento de informações importantes relacionados a esta prática. As RPA devem ser encaradas com uma ferramenta para auxiliar no planejamento e monitoramento, podendo inclusive diminuir custos e aumentar a eficiência da restauração.

REFERÊNCIAS

- Almeida, D. R. A. de ;, Stark, S. C. ., Valbuena, R., Broadbent, E. N. ., Silva, T. S. F. ., Resende, A. F. de;, Ferreira, M. P. ., Cardil, A., Silva, C. A. ., Amazonas, N., Zambrano, A. M. A. ., & Brancalion, P. H. S. (2020). A new era in forest restoration monitoring. *Restoration Ecology*, 28(1), 8–11. <https://doi.org/10.1111/rec.13067>
- Almeida, D. R. A. de ;, Stark, S. C., Chazdon, R., Nelson, B. W., Cesar, R. G., Meli, P., Gorgens, E. B., Duarte, M. M., Valbuena, R., Moreno, V. S., Mendes, A. F., Amazonas, N., Gonçalves, N. B., Silva, C. A., Schietti, J., & Brancalion, P. H. S. (2019). The effectiveness of lidar remote sensing for monitoring forest cover attributes and landscape restoration. *Forest Ecology and Management*, 438(January), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.002>
- Almeida, D. R. A. de ;, Zambrano, A. M. A., Broadbent, E. N., Wendt, A. L., Foster, P., Wilkinson, B. E. ., Salk, C., Papa, D. de A., Stark, S. C., Valbuena, R., Gorgens, E. B., Silva, C. A., Brancalion, P. H. S., Fagan, M., Meli, P., & Chazdon, R. (2020). Detecting successional changes in tropical forest structure using GatorEye drone-borne lidar. *Biotropica*, 52(6), 1155–1167. <https://doi.org/10.1111/btp.12814>
- Almeida, D. R. A. de; (2018). *Assessing tropical forest degradation and restoration through lidar remote sensing*. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), Piracicaba.
- Amirruddin, A. D., Muharam, F. M., Ismail, M. H., Ismail, M. F., Tan, N. P., & Karam, D. S. (2020). Hyperspectral remote sensing for assessment of chlorophyll sufficiency levels in mature oil palm (*Elaeis guineensis*) based on frond numbers: Analysis of decision tree and random forest. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169(December 2019), 105221. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105221>

- ANAC, A. N. de A. C. (2017). Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil - RBAC-E nº 94. *Requisitos Gerais Para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil - RBAC-E Nº 94*, 26. <http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-00>
- ANAC, A. N. de A. C. (2021). *Sistema SISANT*. <https://sistemas.anac.gov.br/sisant>
- ANATEL. (2021). *Agência Nacional de Telecomunicações*. <https://sistemas.anatel.gov.br/mosaico>
- Ataíde, D. H. dos S. (2016). *Aplicação de VANT no mapeamento do uso e cobertura do solo e na geração de modelos 3D da paisagem*. Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro.
- Avtar, R., Suab, S. A., Syukur, M. S., Korom, A., Umarhadi, D. A., & Yunus, A. P. (2020). Assessing the influence of UAV altitude on extracted biophysical parameters of young oil palm. *Remote Sensing*, 12(18), 1–21. <https://doi.org/10.3390/RS12183030>
- Blunk, L. (2019). *Análise de vegetação sob linhas de transmissão com uso de dados de sensores remotamente situados* [Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.]. https://media.neliti.com/media/publications/112355-ID-pengaruh-struktur-aktiva-ukuran-perusaha.pdf%0Aacholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Funcionalidad+Familiar+en+Alumnos+de+1º+y+2º+grado+de+secundaria+de+la+institución+educativa+parroquial+“Peq
- Boeni, A. F. (2016). *Caracterização florística e fitossociológica de uma área em processo de restauração florestal comparada a uma área em sucessão secundária (regeneração natural) no Sul do Brasil*. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “ Luiz de Queiroz .”
- Brancalion, P. H. S., Rodrigues, R. R., & Gandolfi, S. (2015). *Restauração Florestal*. Oficina de textos.
- Brunier, G., Fleury, J., Anthony, E. J., Gardel, A., & Dussouillez, P. (2016). Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology*, 261, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.025>
- Bustamante, M. M. C., Silva, J. S., Scariot, A., Sampaio, A. B., Mascia, D. L., Garcia, E.,

- Sano, E., Fernandes, G. W., Durigan, G., Roitman, I., Figueiredo, I., Rodrigues, R. R., Pillar, V. D., de Oliveira, A. O., Malhado, A. C., Alencar, A., Vendramini, A., Padovezi, A., Carrascosa, H., ... Nobre, C. (2019). Ecological restoration as a strategy for mitigating and adapting to climate change: lessons and challenges from Brazil. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24, 1249–1270. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9837-5>
- Chaves, A. A., La Scalea, R. A., Colturato, A. B., Kawabata, C. L. O., Furtado, E. L., & Branco, K. R. L. J. C. (2015). Using UAVs and digital image processing to quantify areas of soil and vegetation. *Journal of Physics: Conference Series*, 633(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/633/1/012112>
- Chazdon, R. L. (2014). *Second Growth*. The University of Chicago Press.
- Chazdon, R. L. (2016). *Renascimento de florestas: Regeneração na era do desmatamento*. Oficina de textos.
- da Silva, H. (2018). *Utilização De Drone Em Mapeamentos Florestais Para Classificação Do Uso E Ocupação Do Solo*. Universidade Federal do Paraná.
- De Oliveira, F. P., De Souza, A. L., & Filho, E. I. F. (2014). CARACTERIZAÇÃO DA MONODOMINÂNCIA DE AROEIRA (*Myracrodruon urundeuva* Fr. All.) NO MUNICÍPIO DE TUMIRITINGA – MG. *Ciência Florestal*, 24(2), 299–311. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/162354/1/Especies-Nativas-da-Flora-Brasileira-de-Valor-Economico-Atual-ou-Pontecial-Plantas-para-o-Futuro-Regiao-Centro-Oeste-pg-835.pdf>
- De Oliveira, F. P., Filho, E. I. F., De Souza, A. L., & Soares, V. P. (2015). Mapeamento de florestas monodominadas por *Myracrodruon urundeuva* com imagens TM - landsat 5 e rapideye. *Floresta e Ambiente*, 22(3), 322–333. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.090114>
- DECEA. (2021). *Departamento de Controle do Espaço Aéreo - SISTEMA SARPAS*. <https://servicos.decea.mil.br/sarpas/>
- DJI. (2021). *DJI*. <https://www.dji.com/br/phantom-4-adv>
- DroneDeploy. (2021). *Drone Deploy*. <https://www.dronedeploy.com>
- Duran, Z., & Atik, M. E. (2021). the Effect of Interior Orientation Parameters Obtained From Different Calibration Methods on 3D Model Accuracy. *International Journal of*

- Engineering and Geosciences*, 6(2), 74–80. <https://doi.org/10.26833/ijeg.691696>
- Durigan, G., & Ramos, V. S. (2013). *Manejo adaptativo: primeiras experiências na Restauração de Ecossistemas*. Páginas e Letras.
- Eugenio, F. C., Schons, C. T., Mallmann, C. L., Schuh, M. S., Fernandes, P., & Badin, T. L. (2020). Remotely piloted aircraft systems and forests: A global state of the art and future challenges. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(8), 705–716. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0375>
- Farella, E. M., Torresani, A., & Remondino, F. (2020). Refining the joint 3D processing of terrestrial and UAV images using quality measures. *Remote Sensing*, 12(18), 1–26. <https://doi.org/10.3390/rs12182873>
- Gameiro, S., Camila Praxedes Braga Teixeira, Tomas Alexandre da Silva Neto, Lopes, M. de F. L., Souto, C. R. D. M. V. S., & Zimback, C. R. L. (2016). Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI , SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. *Terræ*, 13, 15–22.
- Hao, Z., Lin, L., Post, C. J., Jiang, Y., Li, M., Wei, N., Yu, K., & Liu, J. (2021). Assessing tree height and density of a young forest using a consumer unmanned aerial vehicle (UAV). *New Forests*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09827-w>
- Hentz, A. M. K. ;, Dalla Corte, A. P., Péllico Netto, S., Strager, M. P. ., & Schoeninger, E. R. (2018). Treedetection: Automatic tree detection using UAV-based data. *Floresta*, 48(3), 393–402. <https://doi.org/10.5380/rf.v48i3.56150>
- Hentz, Â. M. K., Silva, C. A., Dalla Corte, A. P., Netto, S. P., Strager, M. P., & Klauberg, C. (2018). Estimating forest uniformity in Eucalyptus spp. and Pinus taeda L. stands using field measurements and structure from motion point clouds generated from unmanned aerial vehicle (UAV) data collection. *Forest Systems*, 27(2), 1–17. <https://doi.org/10.5424/fs/2018272-11713>
- Holl, K. D., & Aide, T. M. (2011). When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1558–1563. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.004>
- Huete, A. R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(1), 295–309.
- Linhares, M. M. de A., Rocha, N. C. C., & Amaral, B. A. da S. (2013). Análise do índice

- MPRI como indicador vegetativo através da correlação do mesmo com o índice NDVI. *Anais XVI Simpósio de Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 1986, 6917–6922.
- Magalhães, L. P. ., Trevisan, L. R., Gomes, T. N. ., & Rossi, F. (2019). Índice de vegetação ajustado ao solo - SAVI adaptado: proposta para caracterizar cobertura vegetal do solo. *Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária*, 97–101.
- Medauar, C. C., Silva, S. de A., Carvalho, L. C. C., Tibúrcio, R. A. S., Lima, J. S. de S., & Medauar, P. A. S. (2018). Monitoring of eucalyptus sprouts control using digital images obtained by unmanned aerial vehicle. *Journal of Sustainable Forestry*, 37(7), 739–752. <https://doi.org/10.1080/10549811.2018.1478309>
- Meli, P., Holl, K. D., Benayas, J. M. R., Jones, H. P., Jones, P. C., Montoya, D., & Mateos, D. M. (2017). A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. *PLoS ONE*, 12(2), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171368>
- Meneses, P. R., De Almeida, T., Roberto, P., Tati, M., Almeida, D., Nuno De Castro, A., & Rosa, S. (2012). *Introdução Ao Processamento De Imagens De Sensoriamento Remoto* (P. R. Meneses & T. De Almeida (eds.)). UNB/CNPq.
- Mônico, A. C. (2012). *Transferência de bancos de sementes superficiais como estratégia de enriquecimento de uma floresta em processo de restauração*. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Moraes, L. F. D., Campello, E. F. C., & Franco, A. A. (2010). Restauração Florestal: Do diagnóstico de degradação ao uso de indicadores ecológicos para o monitoramento das ações. *Oecologia Australis*, 14(2), 437–451. <https://doi.org/10.4257/oeco.2010.1402.07>
- Morgan, J. L., Gergel, S. E., & Coops, N. C. (2010). Aerial photography: A rapidly evolving tool for ecological management. *BioScience*, 60(1), 47–59. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.1.9>
- Naeem, F., Mohsin, M., Rauf, U., & Khan, L. A. (2021). Formal approach to thwart against drone discovery attacks: A taxonomy of novel 3D obfuscation mechanisms. *Future Generation Computer Systems*, 115, 374–386.

<https://doi.org/10.1016/j.future.2020.09.001>

- NBL, E. A., & TNC, T. N. C. (2013). *Manual de Restauração Florestal: Um instrumento de apoio à adequação ambiental de propriedades rurais do Pará*. The Nature Conservancy.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Novo, E. M. L. M. (2010). *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações*. Blucher.
- Ozdemir, U., Aktas, Y. O., Vuruskan, A., Dereli, Y., Tarhan, A. F., Demirbag, K., Erdem, A., Kalaycioglu, G. D., Ozkol, I., & Inalhan, G. (2014). Design of a commercial hybrid VTOL UAV system. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 74(1–2), 371–393. <https://doi.org/10.1007/s10846-013-9900-0>
- Pacheco, A. P. ., Freire, N. C. F., & Borges, U. da N. (2006). Artigos. *Boletim Goiano de Geografia*, 26(1), 49–68. <https://doi.org/10.5216/bgg.v26i1.3546>
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E.; Kuplich, T. M. (2012). *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. (2ª ed.). Ed. Parêntese.
- Reis, B. P., Martins, S. V., Fernandes Filho, E. I., Sarcinelli, T. S., Gleriani, J. M., Leite, H. G., & Halassy, M. (2019). Forest restoration monitoring through digital processing of high resolution images. *Ecological Engineering*, 127(April 2018), 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.11.022>
- Remondino, F., & Gerke, M. (2015). Oblique Aerial Imagery – A Review. *Photogrammetric Week 2015, December*, 75–83.
- Rodrigues, R. R., Gandolfi, S., Nave, A. G., Aronson, J., Barreto, T. E., Vidal, C. Y., & Brancalion, P. H. S. (2011). Large-scale ecological restoration of high-diversity tropical forests in SE Brazil. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1605–1613. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.005>
- Ruza, M. S., Dalla, A. P., Ângela, C., Klein, M., Carlos, H., Sanquetta¹, R., Alberto, C., Emerson, S., & Schoeninger, R. (2017). Inventário de Sobrevivência de povoamento de Eucalyptus com uso de Redes Neurais Artificiais em Fotografias obtidas por VANTs. *Adv. For. Sci*, 4(1), 83–88. <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/4169>
- Salamí, E., Barrado, C., & Pastor, E. (2014). UAV flight experiments applied to the remote

- sensing of vegetated areas. *Remote Sensing*, 6(11), 11051–11081. <https://doi.org/10.3390/rs61111051>
- Santos Santana, L., Araújo E Silva Ferraz, G., Bedin Marin, D., Dienevam Souza Barbosa, B., Mendes Dos Santos, L., Ferreira Ponciano Ferraz, P., Conti, L., Camiciottoli, S., & Rossi, G. (2021). Influence of flight altitude and control points in the georeferencing of images obtained by unmanned aerial vehicle. *European Journal of Remote Sensing*, 54(1), 59–71. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1845104>
- Schadeck, A., Rosa, H. A., & Bortolini, J. (2019). Influência da altura de voo no índice MPRI obtido com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). *Revista Cultivando o Saber*, 12(4), 454–464.
- Senkal, E., Kaplan, G., & Avdan, U. (2021). Accuracy Assessment of Digital Surface Models From Unmanned Aerial Vehicles' Imagery on Archaeological Sites. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 6(2), 81–89. <https://doi.org/10.26833/ijeg.696001>
- Swinfield, T., Lindsell, J. A., Williams, J. V., Harrison, R. D., Agustiono, H., Gemita, E., Schönlieb, C. B., & Coomes, D. A. (2019). Accurate Measurement of Tropical Forest Canopy Heights and Aboveground Carbon Using Structure From Motion. *Remote Sensing*, 11(8). <https://doi.org/doi:10.3390/rs11080928>
- Temba, P. (2000). Fundamentos da Fotogrametria. *Departamento de Cartografia. UFMG*, 1–24. csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/fotogrametria.pdf
- Trindade, C. A., & Nunes, J. C. S. (2018). Influência do uso de pontos de controle de campo na melhoria da acurácia dos dados coletados por meio de VANT nas periciais ambientais. *Revista Brasileira de Criminalística*, 7(1), 17–20. <https://doi.org/10.15260/rbc.v7i1.244>
- Yang, L., Guan, Q., Lin, J., Tian, J., Tan, Z., & Li, H. (2021). Evolution of NDVI secular trends and responses to climate change: A perspective from nonlinearity and nonstationarity characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 254(December 2020), 112247. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112247>
- Zanetti, J. (2017). *Influência Do Número E Distribuição De Pontos De Controle Em Ortofotos Geradas a Partir De Um Levantamento Por Vant*. Universidade Federal de Viçosa.

- Zhang, G., & Hsu, L. T. (2018). Intelligent GNSS/INS integrated navigation system for a commercial UAV flight control system. *Aerospace Science and Technology*, 80, 368–380. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.07.026>
- Zhong, Y., Hu, X., Luo, C., Wang, X., Zhao, J., & Zhang, L. (2020). WHU-Hi: UAV-borne hyperspectral with high spatial resolution (H2) benchmark datasets and classifier for precise crop identification based on deep convolutional neural network with CRF. *Remote Sensing of Environment*, 250(December 2019), 112012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112012>
- Zhu, W., Sun, Z., Yang, T., Li, J., Peng, J., Zhu, K., Li, S., Gong, H., Lyu, Y., Li, B., & Liao, X. (2020). Estimating leaf chlorophyll content of crops via optimal unmanned aerial vehicle hyperspectral data at multi-scales. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178(August), 105786. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105786>