

BRUNA PAOLINELLI REIS

**MONITORAMENTO DE ÁREAS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL E
GERAÇÃO DE RECOMENDAÇÕES DE MANEJO ADAPTATIVO
ATRAVÉS DE IMAGENS OBTIDAS POR VANT E LIDAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R375m
2017

Reis, Bruna Paolinelli, 1990-

Monitoramento de áreas de restauração florestal e geração de recomendações de manejo adaptativo através de imagens obtidas por VANT e LIDAR. / Bruna Paolinelli Reis. – Viçosa, MG, 2017.

ix, 62f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Sebastião Venâncio Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Áreas degradadas - Recuperação. 2. Sensoriamento remoto. 3. Processamento digital de imagens. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

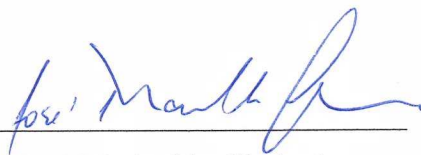
CDD 22 ed. 634.958

BRUNA PAOLINELLI REIS

**MONITORAMENTO DE ÁREAS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL E
GERAÇÃO DE RECOMENDAÇÕES DE MANEJO ADAPTATIVO
ATRAVÉS DE IMAGENS OBTIDAS POR VANT E LIDAR**

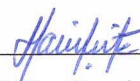
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 14 de julho de 2017.



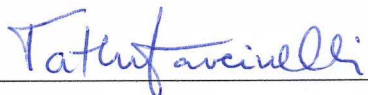
José Marinaldo Gleriani

(Coorientador)



Helio Garcia Leite

(Coorientador)

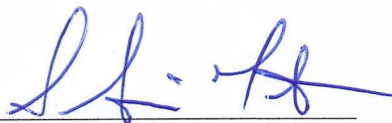


Tathiane Santi Sarcinelli

(Coorientadora)



Elpídio Inácio Fernandes Filho



Sebastião Venâncio Martins

(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos pelo carinho, incentivo, confiança e por estarem sempre presentes;

Aos meus familiares e amigos, que apesar da distância, sempre me apoiaram;

Aos amigos da ENF 09 pelo companheirismo em todos esses anos, seja nos momentos de estudo ou nas horas de diversão;

Às “hermanas” da República Acapulco pela amizade sincera;

Ao Fael pela parceria, cuidado e paciência;

Aos docentes, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, pelos ensinamentos, atenção e constante ajuda;

À Fibria Celulose S.A., pela oportunidade de estágio, pelos conhecimentos repassados e pelo apoio financeiro (convênio Fibria/LARF/SIF);

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos;

Em especial, ao professor Sebastião Venâncio, pela grande confiança, orientação e ensinamentos, aos professores Elpídio Fernandes, Helio Garcia e José Marinaldo Gleriani pela disponibilidade e esforço para que este trabalho se concretizasse, e à Engenheira Florestal Tathiane Sarcinelli, que além de coorientadora, se tornou uma grande amiga.

BIOGRAFIA

BRUNA PAOLINELLI REIS, filha de Maria de Lourdes Paolinelli Reis e Carlos Alberto Demas Reis, natural de Belo Horizonte, Minas Gerais, nasceu no dia 22 de março de 1990.

Estudou no Colégio Pitágoras, em Belo Horizonte, durante todo ensino fundamental e médio.

Ingressou na Universidade Federal de Viçosa, em 2009, no Curso de Engenharia Florestal, concluindo-o no primeiro semestre de 2015.

Em agosto de 2015, iniciou o Mestrado em Ciência Florestal, com ênfase em Meio Ambiente e Conservação da Natureza, no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se a defesa em julho de 2017.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
ARTIGO 1 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA MONITORAMENTO DA RESTAURAÇÃO FLORESTAL	5
RESUMO	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1 - Caracterização da área de estudo	9
2.2 - Obtenção de imagens a partir de VANT e LIDAR	11
2.3 - Monitoramento da cobertura do solo	13
2.4 - Seleção de amostras, classificações e acurácia	14
2.5 - Comparação entre classificações	16
3. RESULTADOS	18
3.1 - Classificação pelo algoritmo da MaxVer e RF de imagens obtidas por VANT	18
3.2 - Classificação pelo algoritmo MaxVer e RF de imagens obtidas por LIDAR	23
3.3 - Comparação entre métodos de imageamento por LIDAR e câmera a bordo de VANT	28
4. DISCUSSÃO	28
5. CONCLUSÕES	32
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
ARTIGO 2 - GERAÇÃO DE RECOMENDAÇÕES DE MANEJO ADAPTATIVO E VALORES DE REFERÊNCIA PARA ÁREAS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL	41
RESUMO	41
ABSTRACT	42

1. INTRODUÇÃO	44
2. MATERIAL E MÉTODOS	45
2.1 - Caracterização da área de estudo	45
2.2 - Determinação de valores de referência para densidade e riqueza de regenerantes.....	47
2.3 - Monitoramento da cobertura do solo e geração de recomendação de manejo adaptativo	47
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
3.1 - Determinação de valores de referência para densidade e riqueza de regenerantes.....	49
3.2 - Monitoramento da cobertura do solo e geração de recomendações de manejo adaptativo	52
4. CONCLUSÕES	57
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
CONCLUSÕES GERAIS	62

RESUMO

REIS, Bruna Paolinelli, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2017. **Monitoramento de áreas de restauração florestal e geração de recomendações de manejo adaptativo através de imagens obtidas por VANT e LIDAR.** Orientador: Sebastião Venâncio Martins. Coorientadores: Helio Garcia Leite, José Marinaldo Gleriani e Tathiane Santi Sarcinelli.

O objetivo deste estudo foi desenvolver um método de monitoramento de áreas de restauração por meio do processamento digital de imagens de uma câmera a bordo de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) e de uma composição dados LIDAR (*Light Detection and Ranging*), de modo a gerar recomendações precisas de manejo adaptativo. Além disso, por meio da análise de um banco de dados de monitoramento ecológico realizado em campo, determinaram-se valores de referência para indicadores ecológicos do processo de restauração. O estudo foi realizado em áreas em processo de restauração da Fibria Celulose S.A, com mais de 48 meses de implantação. Utilizou-se imagens de câmera Canon S110 NIR a bordo de VANT e uma composição de dados LIDAR, que foram classificadas através dos algoritmos da Máxima Verossimilhança (MaxVer) e *Random Forest* (RF), e posteriormente comparou-se a acurácia da classificação (Índice Kappa e Exatidão Global - EG) por meio do teste Z. O indicador de cobertura do solo foi avaliado por imagens separando-se as classes de cobertura de copa, gramíneas e solo exposto. Para se recomendar valores de referência a partir de dados coletados em campo de diversos projetos monitorados na empresa, separou-se um grupo de dados contendo as áreas com cobertura de copa superior a 70%, dentro do qual foi calculada a média entre os quartis Q25 e Q75 dos valores dos indicadores de densidade e riqueza de regenerantes nativos. Para a geração de recomendação de manejo adaptativo, calculou-se a área ocupada pelas diferentes classes de cobertura do solo e elaborou-se um sistema especialista, através do ArcGIS. Em seguida, comparou-se as recomendações geradas a partir de cada imagem classificada. Os valores de EG, Kappa e a avaliação visual das imagens foram excelentes para todas as combinações de métodos (VANT ou LIDAR) e algoritmos utilizados. Entretanto, ao comparar a eficiência dos algoritmos, percebeu-se que tanto para a classificação proveniente de imagens de câmeras a bordo de VANT quanto da composição de dados LIDAR, o algoritmo RF apresentou melhor desempenho que o MaxVer, mas quando se

comparou os métodos de obtenção de imagens não houve diferença significativa indicando que, independente da escolha do método, será possível obter bons resultados com o RF. Definiu-se 940 indivíduos por hectare e três espécies de regenerantes arbóreos ou arbustivos nativos como limiar de referência para considerar a área como adequada nos casos onde o método de restauração foi o plantio de mudas nativas ou condução da regeneração natural realizados há de cinco anos, e 1.700 indivíduos por hectare e cinco espécies nas áreas onde o único método realizado foi o corte ou anelamento das árvores de eucalipto, tendo sido realizado há cerca de 15 a 20 anos. Encontrou-se ligeira diferença entre as recomendações geradas pelas diferentes imagens classificadas. A recomendação mais gerada foi capina ou coroamento e adensamento com mudas de espécies nativas, representando 34% do total das recomendações geradas. O método de monitoramento sugerido por esse estudo se mostrou eficiente, e pode ser considerado promissor para se monitorar áreas em processo restauração, sobretudo em larga escala.

ABSTRACT

REIS, Bruna Paolinelli, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2017. **Monitoring of forest restoration areas and generation of adaptive management recommendations through images obtained by UAV and LIDAR.** Advisor: Sebastião Venâncio Martins. Co-advisors: Helio Garcia Leite, José Marinaldo Gleriani and Tathiane Santi Sarcinelli.

The objective of this study was to develop a methodology for monitoring restoration areas through the digital image processing on board of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and a data composition of Light Detection and Ranging (LIDAR), in order to generate accurate adaptive management recommendations. In addition, through the analysis of an ecological monitoring database carried out in the field, reference values were determined for ecological indicators of the restoration process. The study was carried out in areas in restoration process from Fibria Celulose S. A., with more than 48 months of implantation. It was used images of Canon S110 NIR camera on the UAV and a composition of LIDAR data, which were classified through the algorithms of the Maximum likelihood (MaxVer) and Random Forest (RF), and then the classification accuracy (Kappa Index and Global Accuracy - EG) was compared using the Z test. The soil cover indicator was evaluated by images separating the classes of canopy cover, grasses and bare soil. In order to recommend reference values from the field collected data of several monitored projects in the company, a data group containing the areas with canopy cover of more than 70% was separated, within which the average values from indicators of density and richness of native regenerants was calculated between quartiles Q25 and Q75. For the generation of adaptive management recommendations, the area occupied by the different soil cover classes was calculated and a specialist system was elaborated to define the recommendations through ArcGIS software. Then, the recommendations generated according to each classified image were compared. The values of EG, Kappa and visual evaluation of the images were excellent for all combinations of methods (UAV or LIDAR) and both algorithms used. However, when comparing the efficiency of the algorithms, it was observed that for both the classification from the images of the cameras on board UAV and the composition of LIDAR data, RF algorithm presented better performance than the MaxVer, but when comparing the imaging methods, there were no significant differences, indicating that regardless

of the method choice, it will be possible to obtain good results using RF algorithm. We defined 940 individuals per hectare and three species of native regenerants as the reference threshold to consider the area as adequate, in cases where the restoration method was planting native seedlings or assisted natural regeneration more than five years ago, and 1,700 individuals per hectare and five species in areas where the eucalyptus was harvested 15 to 20 years ago. There was little difference between the recommendations generated by the different classified images, and the most common recommendation was weeding or seedling crowning followed by dense planting with native species (34%). The monitoring methodology suggested by this study was efficient, and can be considered promising to monitor areas in restoration process, especially on a large scale.

INTRODUÇÃO

A restauração florestal pode ser definida como um conjunto de ações que visam acelerar o reestabelecimento da saúde, integridade e sustentabilidade de ecossistemas florestais degradados (SER, 2004). Com o objetivo de aumentar as áreas efetivamente restauradas no Brasil, inúmeras leis, decretos e resoluções têm sido criados (DURIGAN et al., 2010), inclusive após aprovação do Código Florestal, Lei nº 12.651 de 2012, que estabelece medidas de preservação e conservação da vegetação nativa no país. A partir dessa Lei, foi aprovado em janeiro de 2017 o Decreto nº 8.972, que institui a Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Proveg) e cita em suas diretrizes que o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) deverá abranger “a estruturação do sistema de planejamento e monitoramento espacial que apoie a tomada de decisões que visem a recuperação da vegetação nativa”.

Neste cenário, o monitoramento e a avaliação, a longo prazo, de áreas em processo de restauração, é um importante processo a ser considerado (BRANCALION et al., 2012). De acordo com ARONSON et al. (2011), o monitoramento da restauração consiste na “aplicação de indicadores para verificar se os objetivos e metas em cada etapa da restauração estão sendo atingidos, e deve apontar a necessidade ou não de manejo adaptativo”. Embora seja um tema de bastante relevância, ainda há pouco conhecimento a respeito e algumas lacunas precisam ser preenchidas para a efetiva incorporação destas ações no planejamento da restauração ecológica de ecossistemas (RODRIGUES et al., 2009).

O estabelecimento de indicadores-chave e seus respectivos valores de referência para alcance do sucesso da restauração são considerados como limitações ao avanço de técnicas de monitoramento (RODRIGUES et al., 2009; REIS, 2008; BRANCALION et al., 2012). Para a escolha destes indicadores deve-se considerar, principalmente, a facilidade de medição e compreensão, o baixo custo, e que estes representem de forma clara a real situação das áreas avaliadas (DURIGAN et al., 2011). Além disso, a avaliação de diversos indicadores pode ser onerosa e trabalhosa (BRANCALION et al., 2012).

Inúmeros indicadores são descritos em literatura para monitoramento de áreas em processo de restauração, são eles, presença de espécies invasoras, ataque de formigas cortadeiras, número de indivíduos arbóreos e arbustivos nativos,

mortalidade e acréscimo de outras formas de vida. Porém, os mais utilizados são os de caráter vegetativo, como a regeneração natural, chuva de sementes, banco de sementes do solo, cobertura de copa, produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes (MIRANDA, 2011).

O Protocolo de Monitoramento do Pacto pela Restauração da Mata Atlântica estabelece, para seus signatários, uma série de indicadores ecológicos, socioeconômicos e de gestão de projetos a serem mensurados nos projetos de restauração para fins de seu monitoramento (PACTO PELA RESTAURAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA, 2013). O objetivo é o acompanhamento do processo de restauração visando aferir seu sucesso ou corrigir sua trajetória por meio da geração de recomendações de manejo adaptativo.

Tendo em vista a complexidade relacionada ao excesso de indicadores e critérios, muitas vezes de difícil interpretação, e os elevados custos para execução do monitoramento ecológico da restauração em campo, surge a oportunidade de se investir em técnicas de processamento digital de imagens de alta resolução, associadas à elaboração de sistemas especialistas para geração de recomendações, sobretudo para grandes projetos de restauração. Como vantagens associadas ao uso de imagens aéreas de alta resolução espacial podem-se citar a resolução multiespectral e temporal, a visão sinóptica, o ganho de tempo e a praticidade, sendo estas duas últimas também relacionadas ao uso de sistemas especialistas.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi desenvolver e comparar métodos de monitoramento de áreas em processo de restauração por meio do processamento digital de imagens de câmeras a bordo de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) e uma composição de dados LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Espera-se, com isso, promover a redução dos custos envolvidos no processo, maior assertividade do monitoramento e, a partir disso, a geração de recomendações mais precisas de manejo adaptativo para as áreas de restauração.

O estudo foi organizado em dois artigos, intitulados: “Processamento digital de imagens de alta resolução para monitoramento da restauração florestal” e “Geração de recomendações de manejo adaptativo e valores de referência para áreas de restauração florestal”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AROSON, J.; DURIGAN, G.; BRANCALION, P.H.S. Conceitos e definições correlatas à ciência e á prática da restauração ecológica. **Instituto Florestal Série Registros**, v. 44, p. 1-38, 2011.

BRANCALION, P.H.S.; VIANI, R.A.G.; RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. In: Martins, S.V. (Org.). **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**, Editora UFV, Viçosa, MG, Brasil v. 1, p. 262-293, 2012.

BRASIL. Lei Federal n.º 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre o Código Florestal. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 25 maio 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm>. Acesso em: 22 jan. 2017.

BRASIL. Decreto n° 8.972, de 23 de janeiro de 2017. Institui a Política Nacional de Recuperação de vegetação Nativa – Proveg. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 23 de janeiro de 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Decreto/D8972.htm>. Acesso em: 19 abr. 2017.

DURIGAN, G. O uso de indicadores para monitoramento de áreas em recuperação. **Cadernos Mata Ciliar**, São Paulo, n. 4, p. 11-13, 2011.

DURIGAN G, ENGEL VL, TOREZAN JM, MELO ACGD, MARQUES MCM, MARTINS, SV, REIS A., SCARANO, F. R. Normas jurídicas para a restauração ecológica: uma barreira a mais a dificultar o êxito das iniciativas. **Revista Árvore**. v. 34, n. 3, p. 471-485, 2010.

MIRANDA NETO, A. **Avaliação do componente arbóreo, da regeneração natural e do banco de sementes de uma floresta restaurada com 40 anos, Viçosa, MG**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 59 p. 2011.

PACTO PELA RESTAURAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA. **Protocolo de Monitoramento para Programas e Projetos de Restauração Florestal**. 2013. Disponível em: <http://media.wix.com/ugd/5da841_c228aedb71ae4221bc95b909e0635257.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2016.

REIS, D. N. **Desenvolvimento de um índice para avaliação da recuperação de ecossistemas ciliares**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 179 p. 2008.

RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. (Orgs.) **Pacto para a restauração ecológica da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: Instituto BioAtlântica, p.55-61, 2009.

SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION INTERNATIONAL – SER. **The SER primer on ecological restoration**. Society for Ecological Restoration International, Science and Policy Working Group, 2004. Disponível em: <<http://www.ser.org/>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

ARTIGO 1 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO PARA MONITORAMENTO DA RESTAURAÇÃO FLORESTAL

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi elaborar e comparar métodos de monitoramento da restauração florestal utilizando dados de *Light Detection and Ranging* (LIDAR) e imageamento multiespectral com câmera a bordo de Veículo Aéreo Não Tripulável (VANT), além de comparar a eficiência dos algoritmos de classificação supervisionada de Máxima verossimilhança (MaxVer) e *Random Forest* (RF). O estudo foi realizado em uma área de restauração com cerca de 5 anos de implantação, de propriedade da empresa Fibria Celulose S.A., na região Sul do Estado da Bahia. Utilizou-se imagens de câmera Canon S110 NIR a bordo de VANT e uma composição de dados LIDAR aerotransportado. O indicador de restauração monitorado foi a cobertura do solo, sendo separadas as classes: cobertura de copa, solo exposto e gramíneas. As imagens foram classificadas utilizando os algoritmos MaxVer e RF. Para avaliar a acurácia das classificações utilizou-se a Exatidão Global (EG) e o índice Kappa, sendo os resultados comparados pelo teste Z. Os resultados de EG, Kappa e a avaliação visual das imagens foram excelentes em todas as combinações de método de obtenção de imagens e algoritmos analisados. Contudo, ao se comparar a eficiência dos algoritmos utilizados isoladamente, percebeu-se que o algoritmo RF apresentou melhor desempenho que o MaxVer, mas, não houve diferença ($p > 0,05$) entre os métodos de obtenção de imagens (VANT ou LIDAR), indicando que independente da escolha do método será possível obter melhores resultados com o emprego do RF.

Palavras-chave: Light Detection and Ranging (LIDAR), Veículo Aéreo Não Tripulável (VANT), Random Forest, Algoritmo da Máxima Verossimilhança, Recuperação de áreas degradadas

ABSTRACT

The objective of this work was to elaborate and compare methods of forest restoration monitoring using Light Detection and Ranging (LIDAR) data and multispectral imaging with a camera on board a Unmanned Aerial Vehicle (UAV), in addition to comparing the efficiency of supervised classification algorithms Maximum Likelihood (MaxVer) and Random Forest (RF). The study was carried out in a restoration area with about 5 years of implantation, owned by Fibria Celulose S.A., in the southern region of the State of Bahia. We used images from Canon S110 NIR on the UAV and a LIDAR data composition. The monitored restoration indicator was the land cover, being separated in classes: canopy cover, bare soil and grasses cover. The images were classified using the MaxVer and RF algorithms. To evaluate the accuracy of the classifications it was used the Global Accuracy (GA) and the Kappa index, and they were compared using the Z test. The results of EG, Kappa and visual evaluation of the images were excellent in all combinations of the imaging method and algorithms analyzed. However, it was observed that the RF algorithm presented better performance than the MaxVer, both in the classification from LIDAR data images and from VANT cameras. However, there was no difference ($p > 0.05$) among the imaging methods, indicating that, regardless of the choice of method, better results can be obtained with RF.

Keywords: Light Detection and Ranging (LIDAR), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Random Forest, Maximum Likelihood Algorithm, Recovery of Degraded Areas

1. INTRODUÇÃO

Devido à elevada demanda por regularização ambiental de grandes empresas e produtores rurais e à necessidade de se mitigar impactos ambientais gerados pelas atividades produtivas, a restauração florestal tem apresentado rápida ascensão no Brasil (Brancalion et al., 2012). A expansão de trabalhos e técnicas utilizadas em projetos de restauração e as sucessivas avaliações de erros e acertos do passado possibilitou corrigir e adaptar os métodos anteriormente utilizados, de forma a favorecer o reestabelecimento de ecossistemas funcionais e a biodiversidade (Barbosa et al., 2003; Brancalion et al., 2012).

O monitoramento de projetos de restauração florestal a longo prazo é fundamental, uma vez que permite o acompanhamento dos mesmos, visando aferir seu sucesso ou corrigir sua trajetória, evitando desperdício de tempo e recursos investidos (Ruiz-Jaen and Aide, 2005; Melo et al, 2013; Zahawi, 2015). Embora seja um tema de bastante relevância, ainda há pouco conhecimento sobre as técnicas de monitoramento da restauração. Uma limitação é o estabelecimento de indicadores-chave para o sucesso da restauração (Reis, 2008; Rodrigues et al., 2009). A avaliação de diversos indicadores em campo pode ser demorada, onerosa, e requerer técnicos qualificados (Brancalion et al., 2012; Zahawi, 2015).

Abordagens alternativas para avaliar e monitorar diferentes parâmetros de restauração utilizando-se técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens são consideradas promissoras para reduzir a necessidade de métodos de

mensuração em campo, sobretudo para grandes projetos de restauração e para áreas de difícil acesso (Mascaro et al., 2014; Zahawi, 2015). Além disso, com uso de imagens aéreas é possível realizar o acompanhamento dos indicadores para área de estudo como um todo e não somente por meio de amostras, como geralmente é realizado em campo (Durigan, 2011).

A classificação supervisionada é um processo de extração de informação de imagens onde o usuário seleciona amostras representativas das diferentes classes encontradas na imagem (Campbell, 1996). Um algoritmo bastante utilizado para classificação de imagens é o da Máxima Verossimilhança (MaxVer), que considera as classes envolvidas em uma função densidade de probabilidade gaussiana (Pereira et al., 1995). Outro algoritmo, mais robusto, que tem se mostrado muito eficiente na classificação de imagens de satélite, é o *Random Forest* (RF) (Gislason et al., 2006; Lawrence et al., 2006; Watts and Lawrence, 2008; Puissant, 2014). Este algoritmo é baseado na geração de múltiplas árvores de decisão (Breiman, 2001; Gislason et al., 2006; Cutler, 2007), que ao final elegem a classe mais popular (Breiman, 2001), objetivando assim produzir uma classificação de maior acurácia (Cutler, 2007; Puissant, 2014).

Das novas técnicas de sensoriamento remoto que tem sido difundidas, uma que merece destaque é o LIDAR (*Light Detection and Ranging*), que através de pulsos de laser possibilita determinar a distância entre o sensor e a superfície do alvo (Lefsky, 2002). Segundo Giongo (2010), este sensor tem se mostrado eficiente para diferentes aplicações florestais, pois permite a mensuração da topografia das copas (Dubayah, 2000), e de características estruturais importantes, como biomassa (Danilin and Medvedev, 2004; Bortolot and Wynne, 2005) e volume (Ioki et al., 2010; Oliveira, 2014), além de também ser usado para identificação de espécies

(Kim et al., 2007; Holmgren et al., 2008; Peteam, 2015) e em inúmeras outras aplicações.

Outra técnica de sensoriamento remoto que vem sendo utilizada é o uso de câmeras de alta resolução espacial acopladas a VANT (Veículo Aéreo Não Tripulável). Vários estudos já demonstraram a eficiência do processamento destas imagens como, por exemplo, no mapeamento de espécies invasoras (Michez et al., 2016), no planejamento de uso e cobertura do solo (Candido et. al., 2015; Chaves and La Scala, 2015) e no monitoramento da biodiversidade (Koh and Wich, 2012; Getzin et al. 2012; Paneque-Galves et al., 2014).

O objetivo do presente estudo foi elaborar e comparar métodos de monitoramento da restauração florestal utilizando-se imagens de uma composição de dados LIDAR e câmera acoplada VANT, além de comparar a eficiência dos algoritmos de classificação supervisionada de Máxima verossimilhança e *Random Forest*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Caracterização da área de estudo

O presente estudo foi realizado em áreas de Reserva Legal (RL) e de Preservação Permanente (APP) da empresa Fibria Celulose S.A., em uma fazenda denominada “Projeto T734 Maria Mirreis”, localizada no município de Caravelas, Extremo-Sul do estado da Bahia (Figura 1).

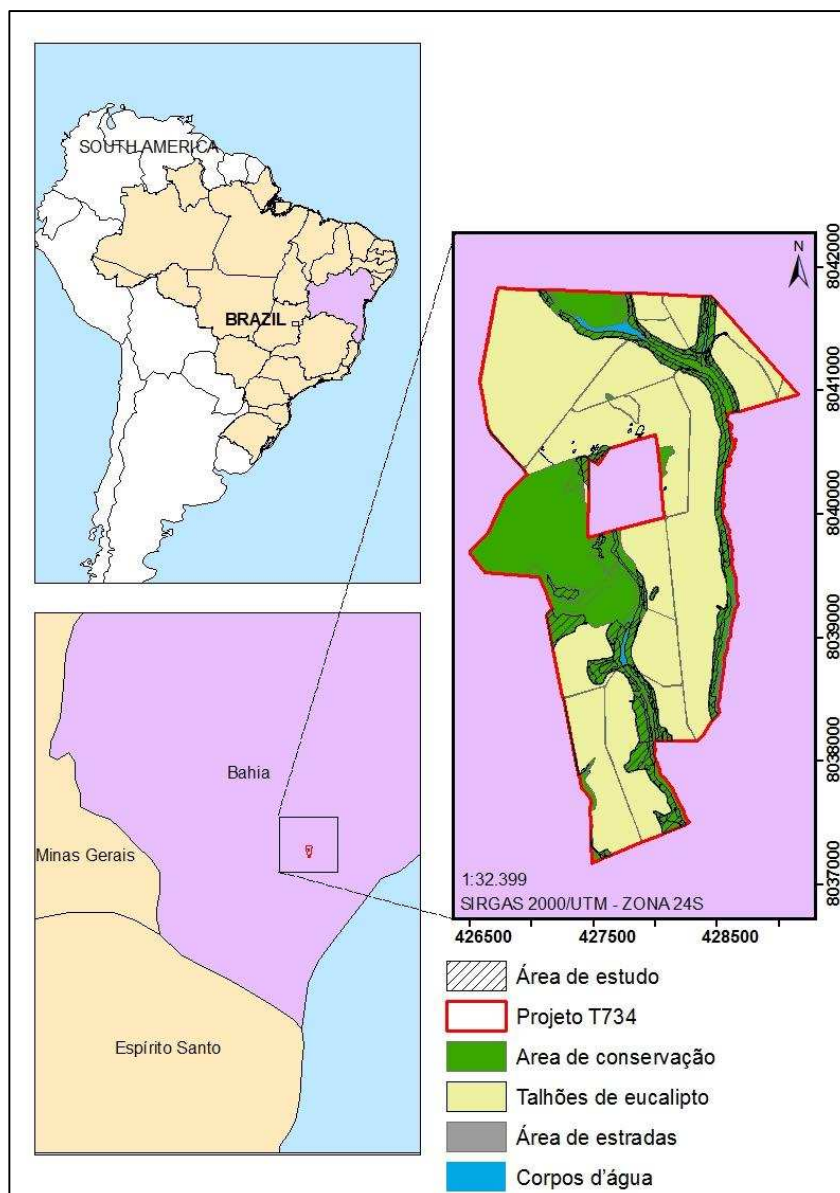


Figura 1 - Localização da área de estudo denominada “Projeto T734 Maria Mirreis”, no Extremo Sul do estado da Bahia, Brasil.

A fazenda possui área total de 664,42 ha, sendo 432,09 ha com eucalipto, 207,17 ha destinados à conservação, 15,78 ha de estradas e 9,38 ha de usos diversos. Existem na fazenda áreas naturais em estágio avançado, médio e inicial de sucessão, muçununga arbórea e brejo, e cerca de 57 ha onde foi iniciado o processo de restauração (Base de vegetação, fechamento de outubro de 2016 - Fibria Celulose), que anteriormente a restauração eram classificadas como áreas de pasto com

diferentes graus de regeneração natural. Essas áreas foram implantadas em 2010 por meio das metodologias de condução da regeneração natural ou de plantio árvores nativas de diversidade e preenchimento (Rodrigues et al., 2009), sendo a condução empregada nos locais com presença de regenerantes arbóreos e arbustivos nativos e o plantio em áreas de pasto limpo (Fibria Celulose S.A., 2016).

De acordo com a classificação de Veloso et al. (1991), na área de abrangência da Fibria predominam as Florestas Ombrófila Densa e Estacional Semidecidual das Terras Baixas, encontradas frequentemente revestindo tabuleiros plio-pleistocênicos do Grupo Barreiras. Como ecossistemas associados podemos citar os alagados, brejos, manguezais, restingas e muçunungas, estas últimas por ora parecendo endêmicas do Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia (Araujo et al., 2008; Sarcinelli, 2010; Saporetti, 2012).

Os solos predominantes da região são os Latossolos e Argissolos Amarelos ou Vermelho-Amarelos, de baixa fertilidade, caulíníticos e, no caso dos Argissolos, com presença de camada adensada em subsuperfície (Abrahão, 1995; Moreau et al., 2006). Segundo a classificação de Köppen, a região se enquadra na transição entre o clima Af, clima tropical quente e úmido no litoral (Zonete et al., 2010), e Am, tropical de monção no interior. A precipitação pluviométrica anual média está em torno de 1.100 mm (Almeida et al., 2008), e a temperatura média de 25 °C, sem estação seca definida (Costa et al., 2009).

2.2 - Obtenção de imagens a partir de VANT e LIDAR

Foram obtidas imagens aéreas da área de estudo a partir de câmeras Canon S110 NIR, acopladas a um VANT. A resolução das imagens capturadas pelas câmeras é de 4000 x 3000 pixels e a resolução espacial é de 0,08 metros.

A câmera captura imagens na região do verde, vermelho e infravermelho próximo (IVP). Calculou-se o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) (Equação 1) e o SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo) (Equação 2), e fez-se uma composição de três bandas e duas transformações espectrais.

$$NDVI = \frac{(ivp - vermelho)}{(ivp + vermelho)} \quad (\text{Equação 1})$$

em que: IVP= banda do infravermelho próximo e vermelho= banda do vermelho

$$SAVI = \frac{(1+Ls) * (ivp - vermelho)}{(Ls + ivp + vermelho)} \quad (\text{Equação 2})$$

em que: Ls é uma constante denominada fator de ajuste do índice SAVI, podendo assumir valores de 0,25 a 1 dependendo da cobertura do solo. Neste caso foi assumido o valor de 0,5, que representa vegetação com densidade intermediária (Huete, 1988).

Também foram obtidas imagens através de um sistema a Laser Aerotransportado RIEGL LMS – Q680I, que opera no Infravermelho Próximo com comprimento de onda de 1.036 nm, denominado LIDAR.

A partir da nuvem de pontos gerada pelo sensor LIDAR, foi possível gerar a imagem de intensidade de retorno do pulso, o Modelo Digital de Superfície (MDS), o Modelo Digital do Terreno (MDT) e o Modelo Digital de Superfície Normalizado (MDSn), que armazena informações de altura dos objetos, sendo obtido através da diferença entre MDS e MDT. Segundo Song et al. (2002), a intensidade pode ser definida como a razão da força da luz refletida por um objeto para a luz emitida e podem ser informações úteis para se classificar a cobertura do

solo. Com os dados obtidos, foi gerada uma imagem com resolução espacial de 0,5 m composta por quatro bandas (Intensidade, MDSn, MDT, MDS), de modo que além das informações de altura da vegetação, tem-se também a informação espectral relacionada à intensidade de retorno do pulso.

2.3 - Monitoramento da cobertura do solo

O indicador de cobertura do solo foi empregado para se monitorar as áreas de restauração da fazenda estudada, por meio da classificação de imagens aéreas em cobertura de copa, solo exposto e gramíneas. Essas classes foram selecionadas considerando-se a possibilidade de obtenção de resultados a partir de análise de imagens aéreas de alta resolução, a importância ecológica relacionada ao monitoramento nas fases iniciais do processo de restauração e a relevância para geração de recomendações de manejo adaptativo, que visam corrigir a trajetória de uma área de restauração possibilitando sua sucessão ecológica.

Para a classificação de imagens provenientes de câmera a bordo de VANT, além das três classes mencionadas, foi necessário estabelecer duas novas classes: áreas escuras, representando sombras e rios presentes na imagem, já que estes objetos têm refletância muito similar, e vazio, representando locais da área de estudo não cobertos pela imagem. Isto foi necessário por três motivos. Primeiro, nas imagens de câmera a bordo de VANT, os polígonos representando as Áreas de Preservação Permanente (APPs) de margens de rios estavam deslocados, abrangendo parte da água. Isto ocorre porque a base de dados utilizada foi elaborada ao partir de imagens provenientes do processamento da nuvem de pontos de LIDAR, que geram uma maior precisão. Outro fato é que a câmera a bordo de VANT é um sensor passivo, que necessita de luz solar como fonte de iluminação para a obtenção de imagens.

Desta forma, a presença de nuvens e sombras modifica a refletância dos objetos, prejudicando as análises. Por último, as imagens obtidas através de câmeras a bordo de VANT abrangem menores extensões do que o LIDAR, ou seja não cobriam toda área do projeto estudado.

2.4 - Seleção de amostras, classificações e acurácia

Coletou-se sobre as imagens de câmera a bordo de VANT e da composição de dados LIDAR 50 amostras representativas de cada classe de cobertura do solo (cobertura de copa, cobertura de solo exposto e cobertura por gramíneas), de mesmo tamanho, sendo em média 450 pixels para as imagens de câmera a bordo de VANT e 55 pixels para imagens de LIDAR. O *software* ArcGIS 10.2 (ESRI, 2015) foi utilizado para a aquisição de amostras. Foram selecionadas aleatoriamente 70% das amostras coletadas para treinamento e 30% das amostras para validação de ambos algoritmos.

A classificação supervisionada pelo algoritmo MaxVer foi feita utilizando o *software* ArcGIS 10.2. Foram realizadas dez classificações distintas, a partir da separação aleatória entre amostras de treino e validação.

A classificação supervisionada utilizando o algoritmo RF foi feita com o *software* R 3.3.3. O script utilizado para classificação permitiu realizar dez classificações com diferentes combinações de amostras de treino e validação. O algoritmo ainda permitiu gerar as variáveis de importância, que representam as variáveis mais importantes para geração das suas árvores de decisão, através de dois métodos, o de “randomization” e o Índice de Gini, descritos por Hastie et al. (2009).

Para se aferir a acurácia dos métodos utilizou-se 30% de amostras selecionadas nas imagens de câmera a bordo de VANT e LIDAR para a fase de

validação. Também foi usada a imagem temática classificada pelos algoritmos para possibilitar a elaboração da matriz de confusão, através dos *softwares* utilizados, e posteriormente obtidos a EG (Equação 3), o índice Kappa (Equação 4) e os erros de omissão (EO) e comissão (EC) para dar uma dimensão da exatidão da classificação. Além disso, foram coletadas em campo dez amostras de cada classe de cobertura, totalizando 30 amostras de validação, sendo que as coordenadas de cada ponto amostrado foram obtidas com receptor de GPS. Esta amostragem foi feita para aferir se a amostragem feita sobre a própria imagem de câmera a bordo de VANT e LIDAR pode ter algum viés que leve a acurácias super ou subestimados. Após a obtenção do valor do Índice Kappa, foi possível enquadrar seu valor em determinadas classificações, segundo a literatura (Tabela 1).

$$EG (\%) = \frac{\sum_{i=1}^k x_{ii}}{N} * 100 \text{ (Equação 3)}$$

em que: EG = Coeficiente de Exatidão Global; x_{ii} = elementos da diagonal principal da matriz de confusão; N = número total de pontos da matriz de confusão.

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \text{ (Equação 4)}$$

em que: K = Coeficiente Kappa; P_o = Proporção de unidades corretamente classificadas; P_c = Proporção esperada de acerto ao acaso.

Tabela 1 - Valores admitidos para o índice Kappa

Kappa	Grau de acordo
$K \leq 0,2$	Péssimo
$0,2 < K \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < K \leq 0,6$	Bom
$0,6 < K \leq 0,8$	Muito bom
$0,81 < K \leq 1,0$	Excelente

Fonte: Adaptado de Landis e Kock (1977).

2.5 - Comparação entre classificações

Para comparar os métodos de classificação foi utilizado o teste Z (Equação 5), com um grau de confiança de 95%, $Z > 1,96$ (Foody, 2004; Congalton and Green, 2009). O procedimento completo utilizado para classificar as imagens provenientes de LIDAR e VANT, com diferentes algoritmos classificadores e a validação realizada para verificação da acurácia dos classificadores, é apresentada na Figura 2.

$$Z_c = \frac{K_1 - K_2}{\sqrt{\text{var}(K_1) + \text{var}(K_2)}} \quad (\text{Equação 5})$$

em que: Z_c = Valor de Z calculado; K_1 = Kappa da matriz 1; K_2 = Kappa da matriz 2; $\text{var}(K_1)$ = variância do Kappa da matriz 1; $\text{var}(K_2)$ = variância do Kappa da matriz 2.

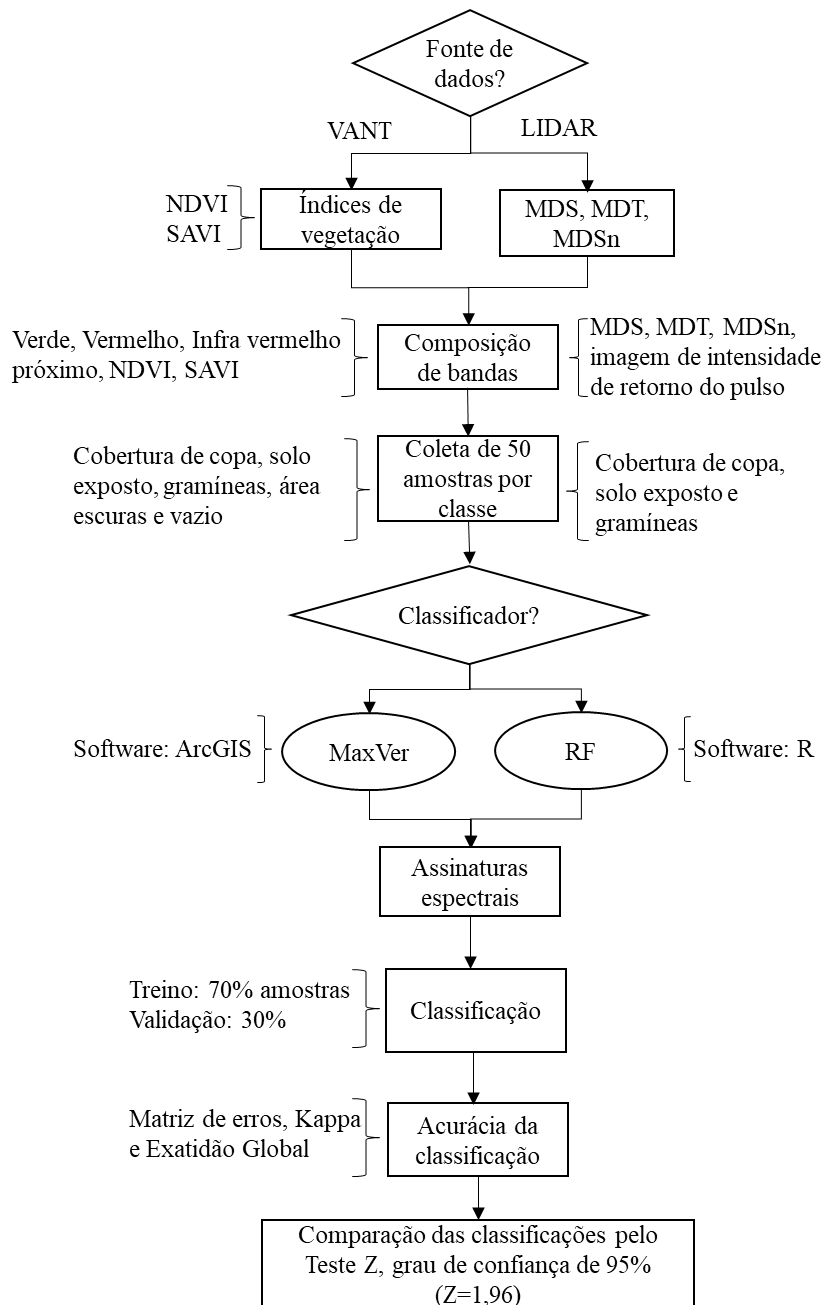


Figura 2 - Fluxograma representando a metodologia utilizada para classificação de imagens provenientes de LIDAR e VANT, por meio de MaxVer e RF, e a aferição da acurácia das classificações. VANT: Veículo Aéreo Não Tripulável, LIDAR: *Light Detection and Ranging*, NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, SAVI: Índice de Vegetação Ajustado ao Solo, MDSn: Modelo Digital de Superfície Normalizado, MDS: Modelo Digital de Superfície, MDT: Modelo Digital de Terreno, MaxVer: Máxima verossimilhança, RF: *Random Forest*.

3. RESULTADOS

3.1 - Classificação pelo algoritmo da MaxVer e RF de imagens obtidas por VANT

As imagens obtidas pela câmera acoplada a VANT, classificadas através do algoritmo de MaxVer e pelo RF, são apresentadas nas Figuras 3 e 4 respectivamente.

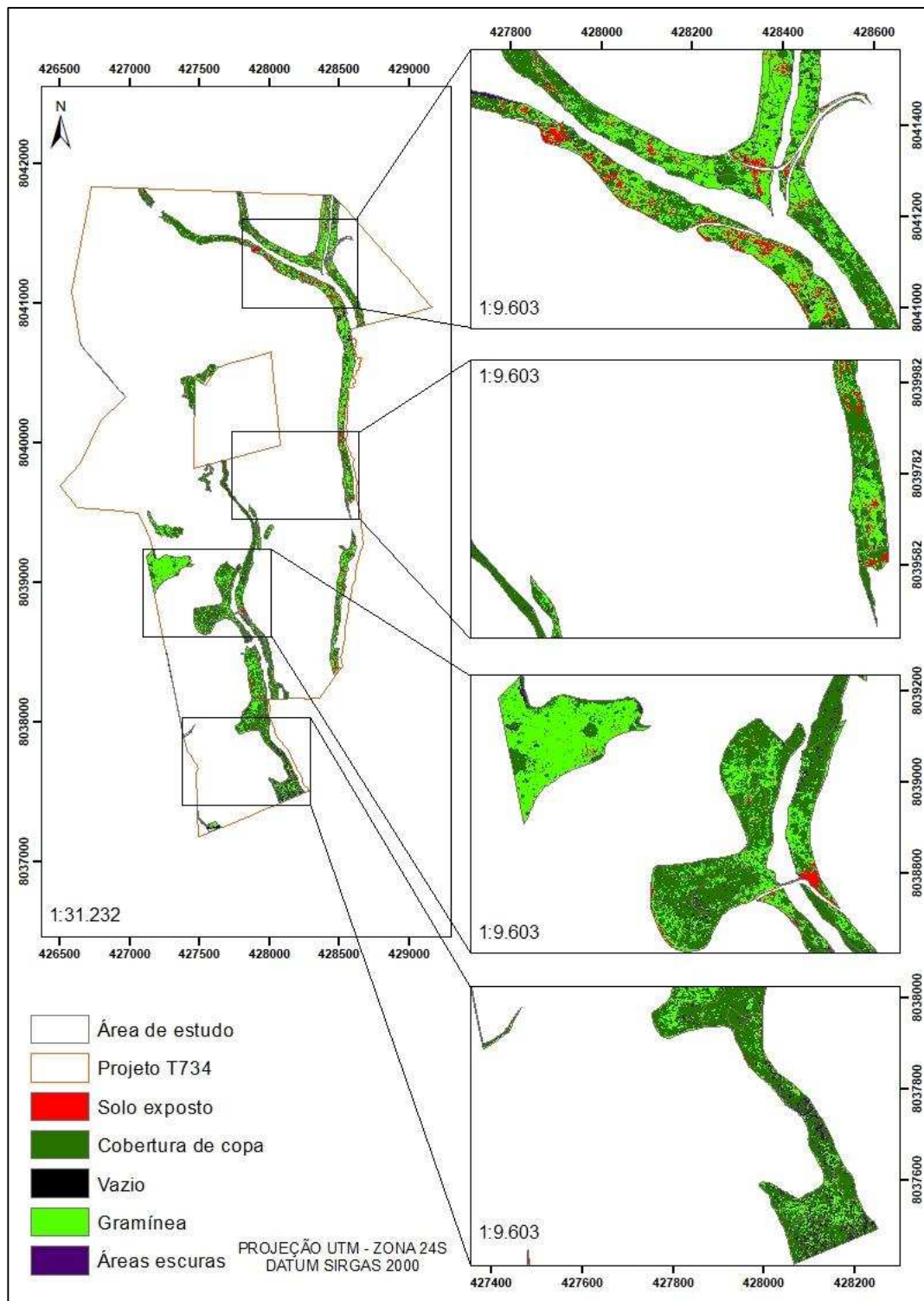


Figura 3 - Imagem temática obtida a partir da classificação da imagem de câmera a bordo de VANT com o algoritmo MaxVer.

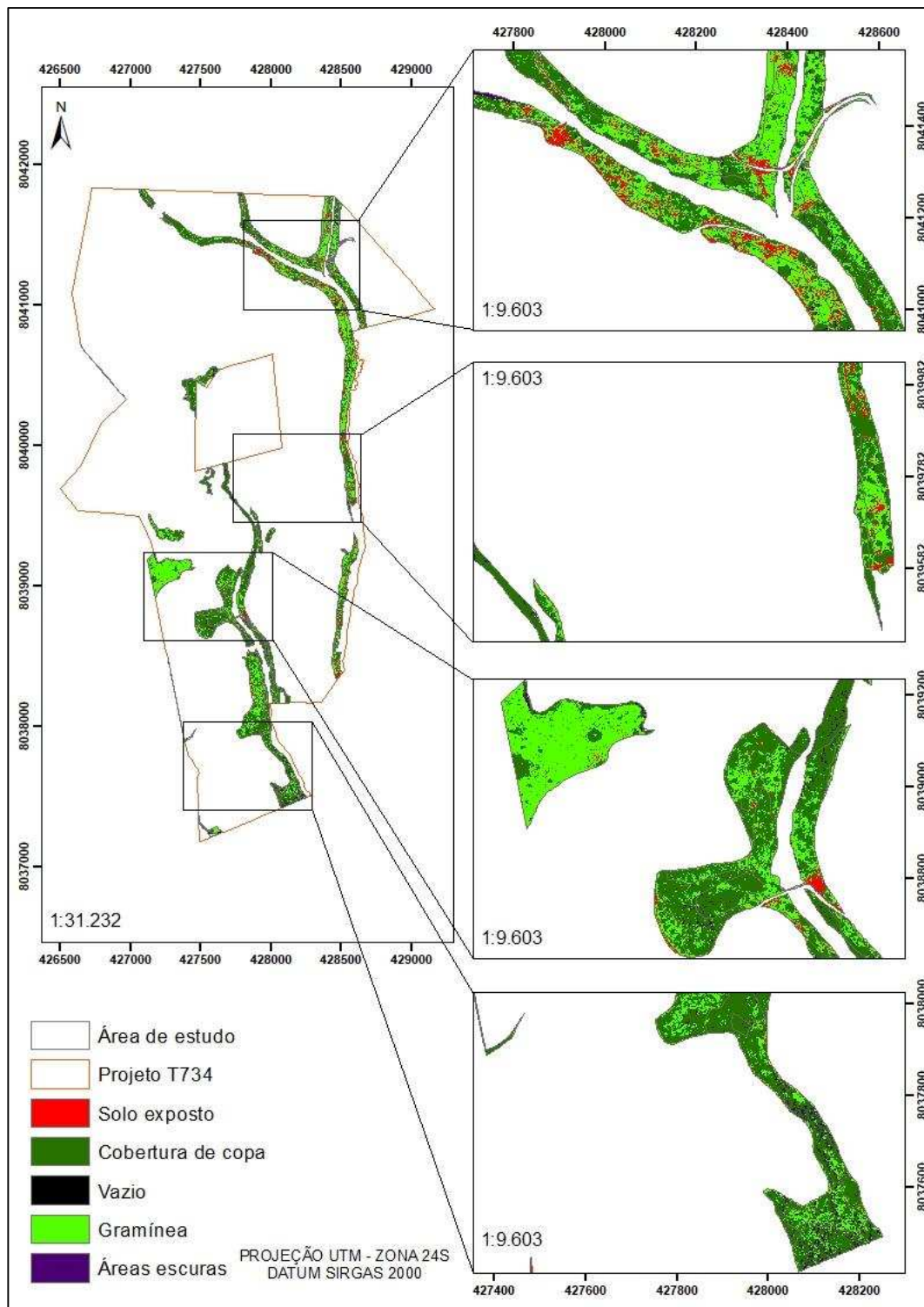


Figura 4 - Imagem temática obtida a partir da classificação da imagem de câmera a bordo de VANT com o algoritmo RF.

A partir das 10 matrizes de confusão geradas, o valor do Kappa mínimo encontrado com o MaxVer foi de 0,72 e o máximo de 0,99, com média de 0,92 e

desvio-padrão de 0,085. Já para RF, o valor do Kappa mínimo encontrado foi de 0,87 e o máximo de 0,99, com média de 0,95 e desvio-padrão de 0,040 (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2 - Tabela referente à média dos valores gerados a partir das dez matrizes de confusão geradas, com o classificador MaxVer, para imagens de câmera acoplada a VANT

CLASSE	Solo exposto	Cobertura de copa	Vazio	Gramínea	Áreas escuras	Total	EO (%)
Solo exposto	6463	3	0	91	388	6945	6,83
Cobertura de copa	0	8097	0	184	94	8375	3,25
Vazio	0	0	4125	0	0	4125	0
Gramíneas	21	65	0	7929	440	8455	5,98
Áreas escuras	376	282	0	114	3858	4630	18,45
TOTAL	6860	8447	4125	8318	4779	32529	
EC (%)	3,79	3,55	0	4,37	10,00		
Kappa Médio						0,92	
EG Médio						0,94	

EG: Exatidão Global, EO: Erro de Omissão, EC: Erro de Comissão.

Tabela 3 - Tabela referente à média dos valores gerados a partir das dez matrizes de confusão, com o classificador RF, para dados VANT

CLASSE	Solo exposto	Cobertura de copa	Vazio	Gramínea	Áreas escuras	Total	EO (%)
Solo exposto	6408	3	0	43	0	6454	0,66
Cobertura de copa	1	6999	0	109	1	7103	1,35
Vazio	0	0	5592	0	0	4473	0
Gramíneas	186	244	0	5836	172	6438	10,57
Áreas escuras	1	80	0	63	2493	2637	6,12
Total	6596	7319	5592	6051	2666	27105	
EC (%)	3,54	4,65	0	3,16	6,88		
Kappa Médio						0,95	
EG Médio						0,97	

EG: Exatidão Global, EO: Erro de Omissão, EC: Erro de Comissão.

Foi verificada diferença significativa pelo teste Z (16,33) entre os classificadores, sendo que o algoritmo RF apresentou melhores resultados de Kappa

e EG, sendo por isso considerado a melhor alternativa para o processamento das imagens.

Ao se realizar a validação utilizando as amostras coletadas em campo, os índices Kappa se mantiveram na faixa do excelente para ambos algoritmos, conforme é apresentado nas Tabelas 4 e 5. A EG também foi considerada elevada em ambos casos, comprovando que os dados de campo condizem com os resultados obtidos através do treinamento e da validação ao se utilizar amostras coletadas na própria imagem.

Tabela 4 - Matriz de confusão utilizando as amostras coletadas em campo, para imagens de câmera acoplada a VANT, com o classificador MaxVer

CLASSE	Solo exposto	Cobertura de copa	Vazio	Gramínea	Áreas escuras	Total	EO (%)
Solo exposto	9	0	0	0	1	10	10
Cobertura de copa	0	10	0	0	0	10	0
Vazio	0	0	4	0	0	4	0
Gramínea	0	0	0	12	0	12	0
Áreas escuras	0	0	0	0	8	8	0
Total	9	10	4	12	9	44	
EC (%)	0	0	0	0	11,11		
Kappa	0,97						
EG	0,98						

EG: Exatidão Global, EO: Erro de Omissão, EC: Erro de Comissão.

Tabela 5 - Matriz de confusão utilizando as amostras coletadas em campo, para imagens de câmera acoplada a VANT, com o classificador RF

CLASSE	Solo exposto	Cobertura de copa	Vazio	Gramínea	Áreas escuras	Total	EO (%)
Solo exposto	10	0	0	0	0	10	0
Cobertura de copa	0	10	0	0	0	10	0
Vazio	0	0	4	0	0	4	0
Gramínea	0	0	0	12	0	12	0
Áreas escuras	0	0	0	1	7	8	12,5
Total	10	10	4	13	7	44	
EC (%)	0	0	0	7,69	0,00		
Kappa	0,97						
EG	0,98						

EG: Exatidão Global, EO: Erro de Omissão, EC: Erro de Comissão.

As variáveis de importância geradas pelo RF para imagem de VANT, em ordem decrescente, foram: banda do vermelho, verde, SAVI, NDVI e infravermelho próximo.

3.2 - Classificação pelo algoritmo MaxVer e RF de imagens obtidas por

LIDAR

As imagens obtidas pela composição de dados de LIDAR, classificadas através do algoritmo de MaxVer e pelo RF, são apresentadas na Figura 5 e 6 respectivamente.

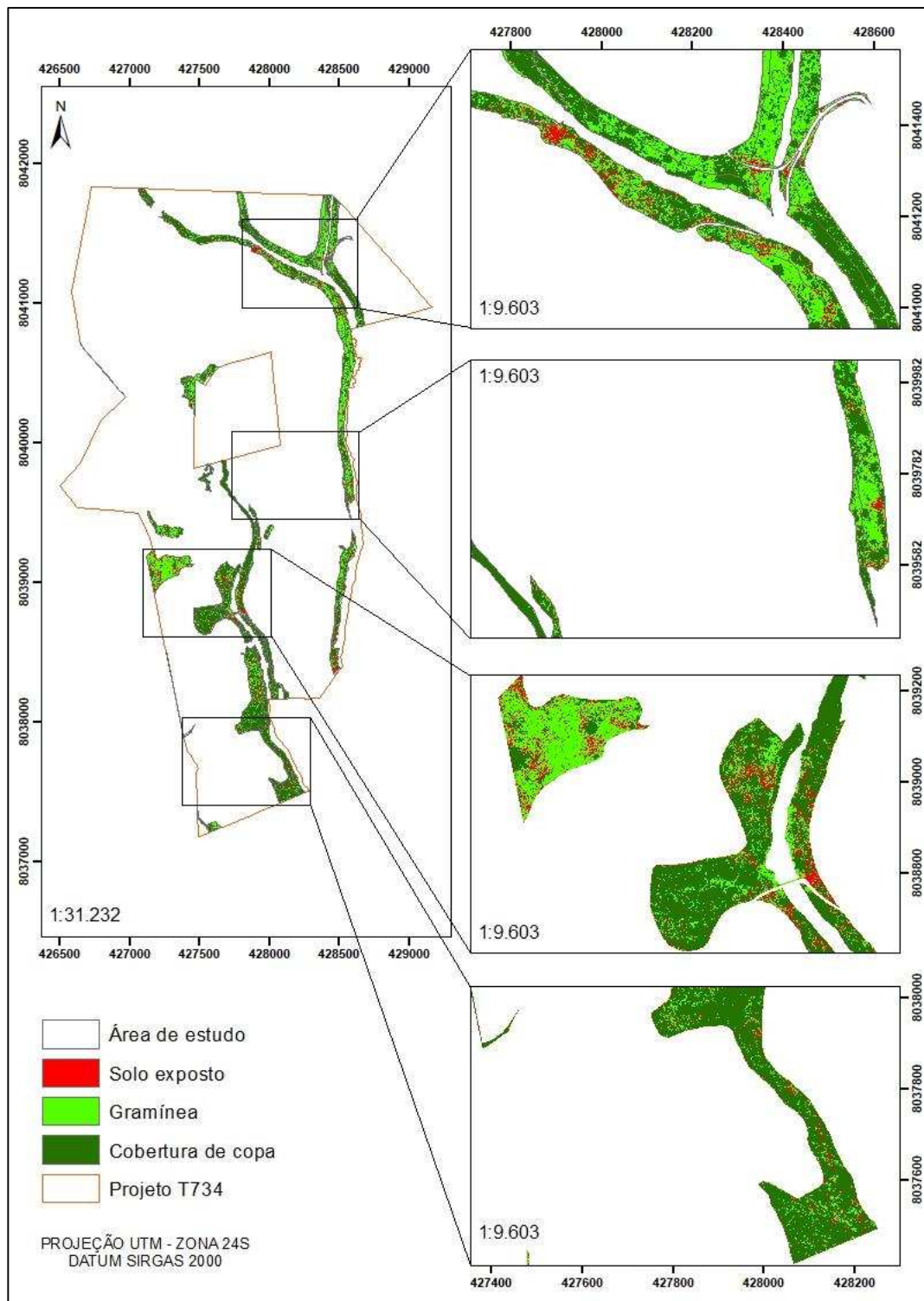


Figura 5 - Imagem temática obtida a partir da classificação da imagem de dados LIDAR com o algoritmo MaxVer.

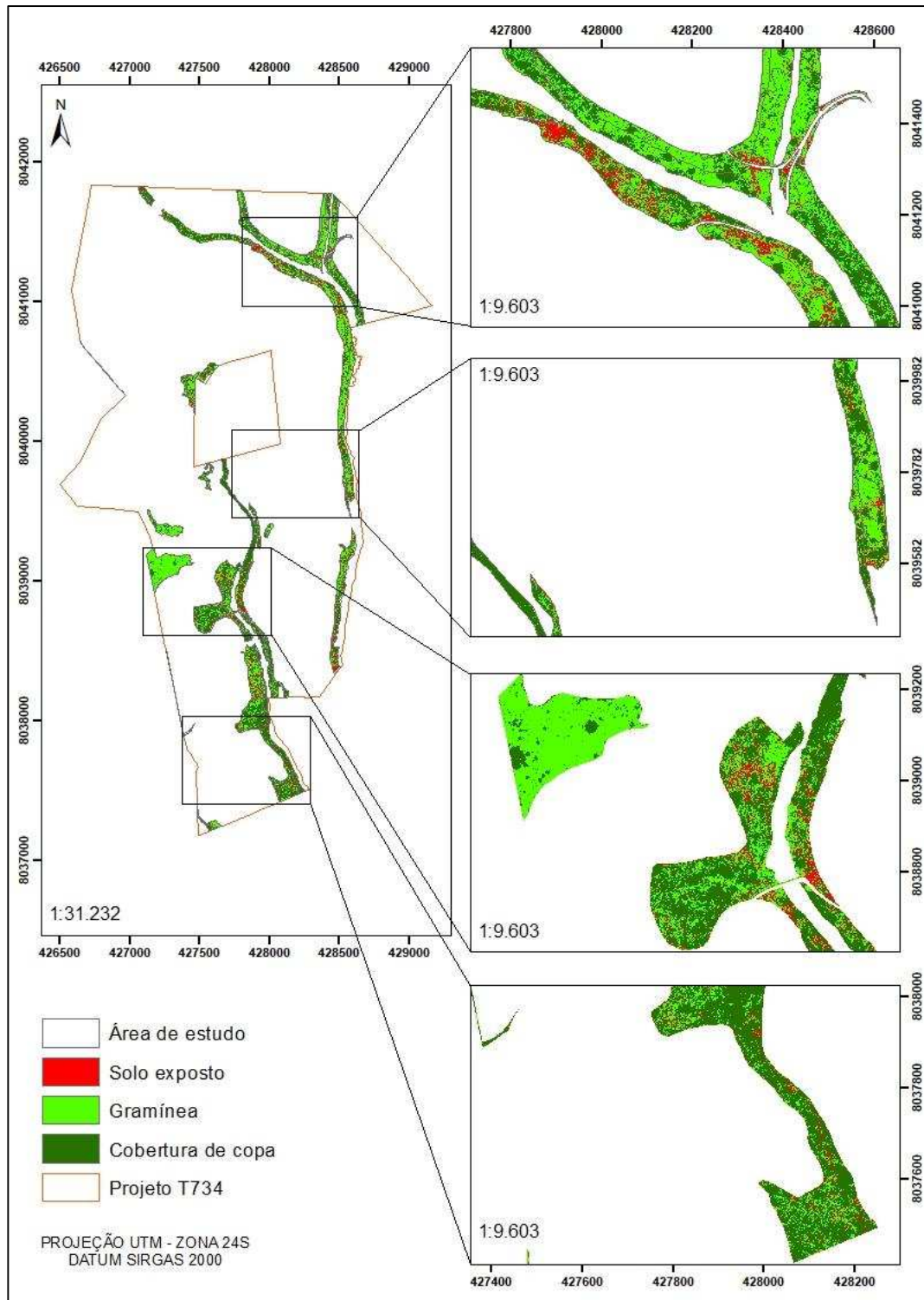


Figura 6 - Imagem temática obtida a partir da classificação da imagem de dados LIDAR com o algoritmo RF.

O valor do Kappa mínimo encontrado com o MaxVer foi de 0,61 e o máximo de 0,98, com média de 0,88 e desvio-padrão de 0,14 (Tabela 6). Já para o

RF, o valor do Kappa mínimo encontrado foi de 0,76 e o máximo de 0,98, com média de 0,94 e desvio padrão de 0,07 (Tabela 7).

Tabela 6 - Tabela referente à média dos valores gerados a partir das dez matrizes de confusão, com o classificador MaxVer, para imagens de câmera acoplada a LIDAR

CLASSE	Solo exposto	Gramínea	Cobertura de copa	Total	EO (%)
Solo exposto	817	0	1	817	0,62
Gramíneas	62	557	31	649	13,84
Cobertura de copa	72	8	678	758	10,50
Total	950	565	710	2225	
EC (%)	10,76	1,68	3,88		
Kappa Médio				0,88	
EG Médio				0,92	

EG: Exatidão Global, EO: Erro de Omissão, EC: Erro de Comissão.

Tabela 7 - Tabela referente à média dos valores gerados a partir das dez matrizes de confusão, com o classificador RF, para dados LIDAR

CLASSE	Solo exposto	Gramínea	Cobertura de copa	Total	EO (%)
Solo exposto	493	14	0	507	2,71
Gramíneas	53	595	1	649	7,87
Cobertura de copa	0	0	642	642	0,00
TOTAL	547	608	643	1798	
EC (%)	8,20	2,23	0,15		
Kappa Médio				0,94	
EG Médio				0,96	

EG: Exatidão Global, EO: Erro de Omissão, EC: Erro de Comissão.

Foi verificada diferença significativa pelo teste Z (5,74) entre os classificadores, tendo o algoritmo RF apresentado melhores resultados.

Quando se utilizou as amostras de campo para validar as classificações, os Kappas se mantiveram na faixa do excelente, tanto para o algoritmo Maxver quanto para o RF, conforme é apresentado nas Tabelas 8 e 9. A EG também foi considerada

elevada, para ambos casos, comprovando que os dados de campo condizem com os resultados obtidos através do treinamento e da validação, utilizando-se amostras coletadas na própria imagem.

Tabela 8 - Matriz de confusão utilizando as amostras coletadas em campo, para imagens de dados LIDAR, com o classificador MaxVer

CLASSE	Solo exposto	Gramínea	Cobertura de copa	Total	EO (%)
Solo exposto	9	1	0	10	10
Gramínea	0	11	1	12	8,33
Cobertura de copa	0	1	9	10	10
Total	9	13	10	32	
EC (%)	0	15,38	10,00		
Kappa	0,86				
EG	0,91				

EG: Exatidão Global, EO: Erro de Omissão, EC: Erro de Comissão.

Tabela 9 - Matriz de confusão utilizando as amostras coletadas em campo, para imagens de dados LIDAR, com o classificador RF

CLASSE	Solo exposto	Gramínea	Cobertura de copa	Total	EO (%)
Solo exposto	10	0	0	10	0
Gramínea	0	12	0	12	0
Cobertura de copa	0	1	9	10	10
Total	10	13	9	32	
EC (%)	0	7,69	0,00		
Kappa	0,95				
EG	0,97				

EG: Exatidão Global, EO: Erro de Omissão, EC: Erro de Comissão.

As variáveis de importância geradas pelo RF para imagem de LIDAR, em ordem decrescente, foram: banda de intensidade, MDSn, MDS e MDT.

3.3 - Comparação entre métodos de imageamento por LIDAR e câmera a bordo de VANT

Considerando que o melhor resultado de classificação foi obtido com o uso do algoritmo RF, comparou-se, para esse algoritmo, os métodos de imageamento por LIDAR e câmera a bordo de VANT. A diferença entre os métodos foi não significativa ($Z = 1,80$) para um grau de confiança de 95%, demonstrando que a escolha do método não interfere nos resultados de forma relevante. Por outro lado, ao se utilizar o MaxVer, encontrou-se diferença significativa ($Z = 4,52$) entre as classificações geradas a partir de LIDAR e VANT. Neste caso, a imagem proveniente de câmera acoplada a VANT gerou uma classificação de maior acurácia.

4. DISCUSSÃO

Ao se analisar visualmente as imagens temáticas geradas a partir da classificação das imagens provenientes de VANT por diferentes algoritmos verifica-se que todas as classes (cobertura de copa, solo exposto, gramíneas, vazio e áreas escuras) foram bem delimitadas e que em ambas situações as classificações foram bastante parecidas. Isto ocorreu também para as imagens temáticas obtidas pela composição de dados LIDAR.

A classe que mais gerou confusões nas imagens de câmera a bordo de VANT foi a de áreas escuras com outras classes, para ambos classificadores. Esta confusão pode ser justificada pelo fato de que áreas visualmente identificadas como sombra possuem também altos valores de reflectâncias em outras bandas, como no caso de áreas de vegetação sombreadas que também têm altos valores na banda do

infravermelho próximo (Ribeiro et al., 2011). Isto pode ser considerado como desvantagem do uso de imagens de câmeras acopladas a VANT, quando comparadas com LIDAR. Neste último, não acontece a interferência de sombras nas imagens (Wagner et al, 2004; Giongo et al., 2010), reduzindo a probabilidade de confusões nas classificações.

Foi observada pouca confusão entre as classes quando se avaliou os dados LIDAR, sendo que a maior confusão foi entre solo exposto e gramíneas. Em estudo realizado por Song et al. (2002) com LIDAR, foi encontrado que somente com o uso da banda de intensidade seria difícil conseguir separar a cobertura de gramíneas da cobertura de copa, mas com a adição das bandas MDSn isso se torna possível. Segundo Thenkabail et al. 2004, um aumento nas bandas espectrais pode melhorar a precisão da classificação, mas somente quando essas bandas são úteis para discriminar as classes. A baixa informação espectral das imagens analisadas parece não ter influenciado negativamente nas classificações, já que em ambas encontraram-se valores de Kappa e EG elevados, com poucos erros de confusão. Porém, houve maior dificuldade na coleta de amostras dentro das imagens de LIDAR, pois o pequeno número de bandas espectrais dificultou a perfeita diferenciação visual das classes no processo de coleta de amostras. Esse problema pode ser contornado com a coleta de amostras no campo.

Conforme citado anteriormente, escolheu-se avaliar a acurácia da classificação através do índice Kappa e da EG porque estas medidas ainda são as mais usadas em classificação. Porém, ambas têm desvantagens a serem consideradas. A EG só considera valores da diagonal principal da matriz de confusão, e, no caso do Kappa, falta a penalização pelas confusões, ou seja, quando

o classificador confunde classes muito diferentes é a mesma coisa que confundir classes parecidas.

Em todas classificações encontrou-se valores de Kappas e EG semelhantes, o que indica que as populações estão bem balanceadas em termos de quantidade de amostras. Os valores de Kappa e EG também foram elevados, denotando a assertividade do classificador.

Apesar dos valores de Kappa muito próximos e classificados como excelentes em todas combinações de imagens e algoritmos, o RF apresentou maiores valores de acurácia que o MaxVer. Como nos estudos realizados por Gislason et al. (2006), onde comparou-se a eficiência do RF com outros classificadores (*ensemble* métodos e CART - árvores de decisão), objetivando classificar uma composição contendo imagens do satélite Landsat, dados de elevação, declividade e aspecto, em 10 classes (diferentes espécies) no Colorado. Por fim, encontrou-se uma exatidão global de 82,8%, sendo o RF considerado melhor devido a sua eficiência e acurácia.

O algoritmo RF tem sido amplamente utilizado por ecólogos devido à sua simples interpretação, alta acurácia, rápido processamento, robustez a *outliers* e ruídos e capacidade de caracterizar interações complexas entre as variáveis (Breiman, 2011; Cutler, 2007).

Uma característica interessante da classificação feita com RF é a possibilidade de se obter as variáveis de importância, principalmente em situações onde se precisa classificar imagens com diversas bandas (Gislason et al., 2006). No trabalho em questão, a variável mais importante da classificação da imagem de LIDAR foi a banda de intensidade, seguida o MDSn. Isto pode ser justificado pelo fato de que a banda de intensidade apresenta a informação espectral e a MDSn a

informação de altura, ou seja, são pouco correlacionadas, fornecendo dados menos redundantes para o classificador (Lu & Weng, 2007). Já para imagens de VANT, as variáveis mais importantes foram a banda do vermelho e do verde, seguidas pelo índice SAVI, que são também as variáveis menos correlacionadas da composição.

Embora o algoritmo MaxVer tenha sido um pouco menos assertivo que o RF, também apresentou resultados classificados como excelentes, o que o torna elegível para este tipo de monitoramento. Este classificador é amplamente utilizado para sensoriamento remoto, apresentando bons resultados quando os dados possuem distribuição normal (Monteiro, 2015) e quando a coleta de amostras representa bem a diversidade espectral da classe a ser mapeada (Oliveira et al, 2013). O MaxVer já se mostrou eficiente em vários trabalhos, como por exemplo no estudo de Silva et al. (2016), que testaram a eficiência deste classificador, após a segmentação, para monitoramento do uso e cobertura do solo de áreas de Cerrado, com imagem de VANT, e obteve altos valores de similaridade (0,94) com a fotointerpretação. No caso de Oliveira et al. (2013), que mapearam fragmentos florestais com monodominância de aroeira, o classificador MaxVer apresentou melhor desempenho ($Kappa = 80$) na classificação de imagens RapidEye quando comparado a Redes Neurais.

Ao comparar as duas maneiras de obtenção das imagens, LIDAR ou câmera a bordo de VANT, com o emprego do RF, não se encontrou diferença significativa, de modo que independente da escolha do método foi possível obter bons resultados.

O uso de LIDAR tem se mostrado bastante eficiente para aplicações florestais, isto porque mobiliza grande quantidade de pontos com alta precisão, baixo custo e alta velocidade de aquisição de dados da estrutura vertical e horizontal das florestas (Giongo et al., 2010). De acordo com dados fornecidos pela Fibria, o

uso de LIDAR é mais viável financeiramente para áreas extensas, já o VANT é viável para imageamento de pequenas áreas.

Para se obter resultados melhores, e possibilitar a avaliação de maior número de indicadores, como densidade de indivíduos arbóreos e arbustivos regenerantes, número de espécies, infestação por invasoras arbóreas e número de estratos de vegetação, dentre outros, através do uso de imagens, sugere-se que seja testado o uso de câmeras fotográficas e LIDAR acoplados, pois além de maior informação espectral haverá também dados de geometria do fenômeno (Persson, 2004). Além disso, o uso de técnicas de classificação de imagens por regiões, através da segmentação das imagens, pode também melhorar os valores de acurácia. No estudo realizado por Holmgren et al. (2008) na Escandinávia para identificar espécies de ocorrência local foram encontrados maiores valores de EG (96%), quando se utilizou a segmentação anteriormente à classificação das imagens de câmera aérea digital combinadas com dados de LIDAR, pelo algoritmo MaxVer. A combinação dos dispositivos permite avaliar maior número de indicações com elevadas acurácias, porém encarece o processo de monitoramento.

5. CONCLUSÕES

Os métodos empregados neste estudo são eficientes para monitorar áreas de restauração trazendo ganhos em qualidade e precisão, análise sinóptica e redução dos esforços de campo, sobretudo em larga escala.

O RF foi o algoritmo que apresentou maior assertividade na classificação de imagens provenientes de câmera a bordo de VANT e de uma composição de dados LIDAR, quando se objetiva monitorar áreas em processo de restauração.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahão, W.A.P., 1995. **Gênese de camadas adensadas em solos de Tabuleiros Costeiros no Sul da Bahia**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG: UFV. 114 p.
- Almeida, T. M., Moreau, A. M.S.S., Moreau, M.S., Pires, M.D.M., Fontes, E.D.O., Góes, L. M., 2008. Reorganização socioeconômica no extremo sul da Bahia decorrente da introdução da cultura do eucalipto. **Sociedade & Natureza**, v. 20, n. 2, p. 5-18.
- Araujo, D.S.D., Pereira, O.J., Peixoto, A.L., 2008. Campos Nativos at the Linhares Forest Reserve, Espírito Santo, Brazil. In: Thomas, W. (ed.). *The Atlantic Coastal Forest of Northeastern Brazil*. **Memoirs of the New York Botanical Garden**, v. 100, p. 365-388.
- Barbosa, L.M., Barbosa, J.M.; Barbosa, K.C., Potomati, A., Martins, S.E., Asperti, L.M., Melo, A.C.G., Carrasco, P.G., Castanheira, S.A., Piliackas, J.M., Contieri, W.A., Mattioli, D.S., Guedes, D.C., Santos Júnior, N., Silva, P.M.S., Plaza, A.P. Recuperação florestal com espécies nativas no Estado de São Paulo: pesquisas apontam mudanças necessárias. **Florestar Estatístico**, v. 6, p. 28-34, 2003.
- Bortolot, Z. J., & Wynne, R. H., 2005. Estimating forest biomass using small footprint LIDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 59, n. 6, p. 342-360.
- Brancalion, P.H.S., Viani, R.A.G., Rodrigues, R. R., Gandolfi, S., 2012. Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. In: Martins, S.V. (Org.). **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**, v. 1, Editora UFV, Viçosa, MG, p. 262-293.

- Breiman, L. 2001. Random forests. **Machine Learning**, v. 45, p.15–32.
- Campbell, J. B., 1996. **Introduction to remote sensing**. New York: The Guilford Press, 622 p.
- Cândido, A. K. A. A., da Silva, N. M., & Paranhos Filho, A. C., 2016. Imagens de Alta Resolução Espacial de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) no Planejamento do Uso e Ocupação do Solo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 38, n. 1, p. 147-156.
- Chaves, A. A., La Scala, R. A., 2015. Uso de VANTs e processamento digital de imagens para a quantificação de áreas de solo e de vegetação. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil.
- Cutler, R., Edwards, T. C., Beard, K. H. Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., Lawler, J. J., 2007. Random Forests for classification in ecology. **Ecology**, v. 88, n. 11, p. 2783-2792.
- Costa, O.V., Cantarutti, R.B., Fontes, L.E.F., Costa, L.D., Nacif, P.G.S., Farias, J.C., 2009. Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de tabuleiro costeiro no sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1137-1145.
- Congalton, R., Green, K., 2009. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and Practices**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 183 p.
- Danilin, I., Medvedev, E., 2004. Forest inventory and biomass assessment by the use of airborne laser scanning method (example from Siberia). **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n.8, p. 139-144.

- Dubayah, R.O., Drake, J.B., 2000. LIDAR Remote Sensing for Forestry. **Journal of Forestry**, v. 98, 44-46.
- Durigan, G., 2011. O uso de indicadores para monitoramento de áreas em recuperação. **Cadernos Mata Ciliar**, São Paulo, n. 4, p. 11-13.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2015. **ArcGIS for Desktop**. Versão 10.3. Redlands, Califórnia, Estados Unidos.
- Fibria Celulose S.A. 2016. **Manual de Restauração Ambiental**.
- Foody, G.M., 2004. Thematic map comparison: evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.70, n. 5, p. 627-633.
- Getzin, S., Wiegand, K., Schoening, I., 2012. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and Unmanned Aerial Vehicles. **Methods in Ecology and Evolution**. v. 3, p. 397-404.
- Giongo, M., Koehler, H. S., do Amaral Machado, S., Kirchner, F. F., Marchetti, M., 2010. LIDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231.
- Gislason, P. O., Benediktsson, J. A., Sveinsson, J. R., 2006. Random forests for land cover classification. **Pattern Recognition Letters**, v. 27, n. 4, p. 294-300.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., 2009. **The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction**. Springer New York: Springer Series in Statistics.
- Holmgren J., Persson Å., Söderman U., 2008. Species identification of individual trees by combining high resolution LIDAR data with multi spectral images, **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1537-1552.

- Huete, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI), 1988. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309.
- Ioki, K., Imanishu, J., Sasaki, T., Morimoto, Y., Kitada, K., 2010. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LIDAR: plot-based approach. **Landscape and Ecological Engineering**, v.6, n.1, p. 29-36.
- Kim, S., McGaughey, R.J., Andersen, H.-E., Schreuder, G., 2009. Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 8, p. 1575-1586.
- Landis, J., Koch, G. G., 1977. The measurements of agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174.
- Lawrence, R.L., Wood, S.D., Sheley, R.L., 2006. Mapping invasive plants using hyper-spectral imagery and Breiman Cutler classifications (Random Forest). **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p.356–362.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., Harding, D. J., 2002. LIDAR remote sensing for ecosystem studies. **BioScience**, v. 52, n. 1, p. 19-30.
- Lu, D., Weng Q., 2007. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28:5, p. 823-870.
- Mascaro, J., Asner, G.P., Davies, S.J., Dehgan, A., Saatchi, S., 2014. These are the days of lasers in the jungle. **Carbon Balance Management**. v. 9, n. 1, p. 7.
- Melo, F.P.L., Pinto, S.R.R., Brancalion, P.H.S., Castro, P.S., Rodrigues, R.R., Aronson, J., Tabarelli, M., 2013. Priority setting for scaling-up tropical

- forest restoration projects: early lessons from the Atlantic Forest Restoration Pact. **Environmental Science and Policy**, v. 33, p. 395–404.
- Michez, A., Piégay, H., Jonathan, L., Claessens, H., & Lejeune, P., 2016. Mapping of riparian invasive species with supervised classification of Unmanned Aerial System (UAS) imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 44, p. 88-94.
- Monteiro, F. P., 2015. Classis: uma metodologia para classificação supervisionada de imagens de satélite em áreas de assentamento localizados na Amazônia. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Pará. Belém, PA: UFPA, 82f.
- Moreau, A.M.S.S., Ker, J.C., Costa, L.M., Gomes, F.H., 2006. Caracterização de solos de duas toposequências em Tabuleiros Costeiros do Sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 30, p. 1007-1019.
- de Oliveira, F. P., Filho, E. I. F., Soares, V. P., 2013. Mapeamento de fragmentos florestais com monodominância de aroeira a partir da classificação supervisionada de imagens RapidEye1. **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, p. 151-161.
- de Oliveira, L. T., Ferreira, M. Z., de Carvalho, L. M. T., Ferraz Filho, A. C., de Andrade Oliveira, T. C., de Oliveira Silveira, E. M., & Junior, F. W. A., 2014. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 9, p. 692-699.
- Paneque-Gálvez, J., McCall, M. K., Napoletano, B. M., Wich, S. A., & Koh, L. P., 2014. Small drones for community-based forest monitoring: An assessment

of their feasibility and potential in tropical areas. **Forests**, v. 5, n. 6, p. 1481-1507.

Pereira, R. S., Madruga, P.R.A., Hasenack, H., 1995. **Geoprocessamento aplicado ao planejamento de uso de recursos naturais**. Santa Maria: UFSM/DER/FATEC, 40 p.

Persson, A., Holmgren, J., Söderman, U., Olsson, H., 2004. Tree species classification of individual trees in Sweden by combining high resolution laser data with high resolution near-infrared digital images. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 8, p. 204-207.

Petean, F. C. D. S., 2015. Uso de imagens hiperespectrais e da tecnologia LIDAR na identificação de espécies florestais em ambiente urbano na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP: USP/ESALQ. 132 f.

Puissant, A., Rougier, S., Stumpf, A., 2014. Object-oriented mapping of urban trees using Random Forest classifiers. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 26, p. 235-245.

Reis, D.N., 2008. **Desenvolvimento de um índice para avaliação da recuperação de ecossistemas ciliares**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG: UFLA. 179 p.

Ribeiro, B.M.G., Fonseca, L.M.G., Kux, H.J.H., 2011. Mapeamento da cobertura do solo urbano utilizando imagens Worldview-ii e o sistema interimage. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, p. 51-63.

Rodrigues, R.R., Brancalion, P. H. S., Isernhagen, I., 2009. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: LERF/ESALQ: Instituto BioAtlântica. 256 p.

- Ruiz-Jaen, M.C., Aide, T.M., 2005. Restoration Success: How is it being measured? **Restoration Ecology**, v. 13, 569 -577.
- Saporetto Junior, A.W., Schaefer, C.E.G.R., Souza, A.L., Soares, M.P., Araújo, D.S.D., Meira-Neto J.A.A., 2012. Influence of soil physical properties on plants of Mussununga ecosystem, Brazil. **Folia Geobot**, v. 47, p. 29-39.
- Sarcinelli, T.S., 2010. **Muçunungas: enclaves de vegetação arenícola na Floresta Atlântica de Tabuleiro**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG: UFV. 186 f.
- Silva, F. C. M., Silva, N. M., Cândido, A. K. A. A., 2016. Seleção de técnicas de classificação de fotografias aéreas derivadas de VANT na análise ambiental de área de cerrado. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 10, n.1.
- Song, J. H., Han, S. H., Yu, K. Y., & Kim, Y. I., 2002. Assessing the possibility of land-cover classification using LIDAR intensity data. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. 3/B, p. 259-263.
- Thenkabail, P.S., Enclona, E.A., Ashton, M.S., Legg, C. and De Dieu, M.J., 2004. Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 23-43.
- Veloso, H.P., Rangel Filho, A.L.R., Lima, J.C.A., 1991. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 124 p.
- Wagner, W.; Ullrich, A.; Melzer, T.; Briese, C.; Kraus, K., 2004. From single-pulse to fullwaveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: ISPRS Congress, Istanbul, Turkey. **Geo-Imagery Bridging Continents: proceedings...Istanbul**, p. 201-206.

- Watts, J.D., Lawrence, L., 2008. Merging Random Forest classification an object-oriented approach for analysis of agricultural lands. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 37 (Part4/B7), p. 579–582.
- Zahawi, R.A., Dandois, J.P., Holl, K.D., Nadwodny, D., Reid, J. L., Ellis, E. C., 2015. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. **Biological Conservation**, v. 186, p. 287-295.
- Zonete, M.F., Rodriguez, L.C.E., Packalén, P., 2010. Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 86, p. 225-235.

ARTIGO 2 - GERAÇÃO DE RECOMENDAÇÕES DE MANEJO ADAPTATIVO E VALORES DE REFERÊNCIA PARA ÁREAS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL

RESUMO

O presente estudo foi dividido em duas partes, sendo que a primeira apresenta uma proposta de valores de referência para indicadores de densidade e riqueza de regenerantes arbóreos e arbustivos nativos, e a segunda teve o objetivo de elaborar um sistema especialista para a geração de recomendação de manejo adaptativo para áreas em processo de restauração a partir de imagens de sensores a bordo de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulável) como câmeras multiespectrais e uma composição de dados LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Na primeira parte do estudo, os indicadores de densidade e riqueza de regenerantes foram mensurados em parcelas plotadas em talhões de restauração com mais de 70% de cobertura de copa, conforme preconizado como limite para o monitoramento ecológico (fase II) pelo Pacto pela Restauração da Mata Atlântica. A avaliação foi realizada em diversos projetos de restauração da Fibria Celulose no Sul da Bahia, Norte do Espírito Santo e Noroeste de Minas Gerais, implantados por meio das metodologias de condução da regeneração natural e plantio de espécies nativas, com de cerca de cinco anos de idade, e em áreas onde houve retirada do eucalipto há 15 a 20 anos atrás, sendo consideradas áreas de referência para se aferir o sucesso da restauração. Calculou-se a média entre os quartis Q25 e Q75 para cada indicador a fim de se definir seus valores de referência. A segunda parte do estudo foi realizada em um projeto da empresa onde se iniciou a restauração entre os anos de 2010 e 2012 por meio dos métodos de condução da regeneração e plantio de nativas. Foi avaliado por imagens o indicador de cobertura do solo, obtendo-se os percentuais de cobertura de copa, gramíneas e solo exposto dos talhões de restauração, obtidos através da classificação das imagens de câmeras a bordo de VANT e de uma composição de dados LIDAR previamente classificadas pelos algoritmos *Random Forest* e Máxima Verossimilhança. A partir disso, elaborou-se um sistema especialista em ArcGIS para se definir as recomendações de manejo adaptativo de acordo com as classes de cobertura do solo e, depois comparou-se as recomendações geradas entre os diferentes algoritmos e tipos de imagens. Como resultado da primeira parte do estudo, encontrou-se o valor de 940 indivíduos por hectare e no mínimo três

espécies de regenerantes arbustivos ou arbóreos nas parcelas como referência para se considerar a área de restauração como adequada cinco anos após sua implantação, e 1.700 indivíduos por hectare e no mínimo cinco espécies nas parcelas nas áreas de referência, que são os valores sugeridos para que a área seja considerada como adequada aos 15 a 20 anos após sua implantação. Na segunda parte do trabalho, encontrou-se ligeira diferença entre as recomendações geradas pelas diferentes combinações de imagens e classificadores, sendo a recomendação de manejo adaptativo mais frequente a de capina ou coroamento seguida de plantios de adensamento (34%) para todos os métodos avaliados. Os métodos de monitoramento por imagens sugeridos por esse estudo possibilitam a redução do tempo, custo e aumentam a exatidão das recomendações de manejo geradas. A definição de valores de referência de densidade e riqueza de regenerantes visam facilitar a tomada de decisão relativa à realização de ações de restauração adicionais em áreas já bem recobertas, visando o incremento da diversidade de espécies nos projetos de restauração e a garantia do processo de sucessão florestal.

Palavras-chave: VANT (Veículo Aéreo Não Tripulável) e LIDAR (*Light Detection and Ranging*), Recuperação de Áreas Degradadas.

ABSTRACT

The present study was divided in two parts. The first one presents a proposal of reference values for indicators of density and richness of native regenerants, and the second one had the objective of elaborating a expert system for generation of adaptive management recommendations for areas in restoration process from sensor images on board UAV (Unmanned Aerial Vehicle) such as multispectral cameras and LIDAR (Light Detection and Ranging). In the first part of the study, the indicators of density and richness of regenerants were measured in plots plotted in restoration plots with more than 70% crown cover, as recommended as a limit for ecological monitoring (phase II) by the Pact for Restoration of Atlantic forest. The evaluation was carried out in several restoration projects from Fibria Celulose in Southern Bahia, Northern Espírito Santo and Northwest of Minas Gerais, implemented through the methods of assisted natural regeneration and planting native species, aged about five years, and in areas where eucalyptus was harvested from 15 to 20 years ago, being considered reference areas to measure the restoration

success. The mean between quartiles Q25 and Q75 for each indicator was calculated in order to define their reference values. The second part of the study was carried out in a project of the company where the restoration began between the years 2010 and 2012 through the methods of assisted natural regeneration and planting native seedlings. The soil cover indicator was evaluated by images, obtaining the percentages of canopy cover, grasses and bare soil of the restoration areas, obtained through the classification of the images of cameras on board VANT and a composition of previously classified LIDAR data by Random Forest and Maximum Likelihood algorithms. An expert system was developed in ArcGIS to define adaptive management recommendations according to the soil cover classes, and then compared the recommendations generated between the different algorithms and types of images. As a result of the first part of the study, the value of 940 individuals arboreal or shrub per hectare and at least three species of regenerants in the plots as reference was found to consider the restoration area as appropriate five years after its implantation, and 1,700 individuals per hectare and at least five species in the plots for the reference areas, which are the suggested values for the area to be considered adequate 15 to 20 years after its implantation. In the second part of the study, there was a slight difference between the recommendations generated by the different combinations of images and classifiers, and the adaptive management recommendation more frequent was weeding or seedling crowning followed by dense planting (34%) for all evaluated methods. In this way, the image monitoring methods suggested by this study proved to be efficient, mainly by reducing the time, cost and increase the accuracy of the generated management recommendations. The definition of reference values of density and richness of regenerants aims to facilitate the decision making regarding the accomplishment of additional restoration actions in areas already well covered, aiming to increase the diversity of species with good cover canopy (70%) in the restoration projects and to guarantee the forest succession process.

Keywords: Light Detection and Ranging (LIDAR), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Random Forest, Maximum Likelihood Algorithm, Recovery of Degraded Areas

1. INTRODUÇÃO

Segundo a *Society for Ecological Restoration International* (2004), restauração ecológica é um processo que auxilia a recuperação de ecossistemas degradados. Este processo teve rápida ascensão em todo mundo nas últimas décadas (BRANCALION et al., 2012), impulsionado pela conscientização ambiental da população (DURIGAN e RAMOS, 2013) e pela necessidade de atendimento legal por grandes empresas e produtores rurais. No Brasil, este avanço se deu principalmente após a aprovação do Código Florestal, Lei 12.651 de 2012.

A partir do que foi disposto na Lei anteriormente citada, o governo brasileiro aprovou o Decreto nº 8.972, de janeiro de 2017, que institui a Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Proveg). Uma de suas diretrizes (Artigo 6º) afirma que o Planaveg (Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa) deverá contemplar “a estruturação do sistema de planejamento e monitoramento espacial que apoie a tomada de decisões que visem à recuperação da vegetação nativa”.

Neste cenário, diversos trabalhos relacionados à restauração florestal têm sido desenvolvidos, sendo possível aprender através dos erros e acertos envolvidos no desenvolvimento desses projetos (BARBOSA et al., 2003 DURIGAN e RAMOS, 2013). Desta forma, é importante monitorar áreas que estão em processo de restauração, já que através deste monitoramento é possível aferir sobre seu sucesso (RUIZ-JAEN e AIDE, 2005; BRANCALION et al., 2012; MELO et al., 2013; PACTO PELA RESTAURAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA, 2013) e corrigir sua trajetória por meio da geração de recomendações de manejo adaptativo (BRANCALION et al., 2012; PACTO PELA RESTAURAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA, 2013). De acordo com Aronson et al. (2011), manejo adaptativo pode ser definido “como a forma de manejo que estimula, quando necessárias, mudanças periódicas nos objetivos e protocolos de manejo, em resposta aos dados de monitoramento”. A implementação de ações de monitoramento e manejo adaptativo aumentam a eficiência dos processos ecológicos e evitam desperdício de tempo e recursos investidos (BRANCALION et al., 2012; PACTO PELA RESTAURAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA, 2013; ZAHAWI, 2015).

Atualmente, existem inúmeros indicadores ecológicos, socioeconômicos e de gestão de projetos para monitoramento de áreas em processo de restauração. A

mensuração desses indicadores, através da alocação de parcelas em campo, pode ser demorada e onerosa, além de requerer técnicos qualificados (ZAHAWI, 2015). Também pode ser complexa a etapa de processamento de bases de dados de grandes projetos de restauração e a definição de valores de referência para os indicadores do processo, que normalmente são generalizados para diferentes realidades. O uso de técnicas de classificação supervisionada de imagens de alta resolução, associadas à elaboração de sistema especialista, podem ser consideradas ferramentas promissoras para o monitoramento e a geração de recomendações de manejo adaptativo, sobretudo para extensas áreas de restauração. Segundo Mendes (1997) e Lopes e Higa (2005), sistemas especialistas lógicos são baseados em conhecimento, construídos, principalmente, com regras que reproduzem o conhecimento do perito, essas regras geralmente são sentenças booleanas ou binárias.

O presente estudo foi dividido em duas partes, sendo que na primeira parte é apresentada uma proposta de valores de referência para indicadores de densidade e riqueza de regenerantes arbóreos e arbustivos nativos, por meio da análise de um banco de dados de monitoramento ecológico realizado em campo. Na segunda parte foi elaborado um sistema especialista para geração de recomendação de manejo adaptativo para áreas em processo de restauração a partir de imagens de câmera a bordo de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulável) e dados LIDAR (*Light Detection and Ranging*) previamente classificadas pelos algoritmos *Random Forest* (RF) e Máxima Verossimilhança (MaxVer).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Caracterização da área de estudo

As duas partes deste estudo foram realizadas em áreas de Reserva Legal (RL) e Preservação Permanente (APP) da Fibria Celulose S.A., que foram objeto de ações de restauração florestal. A primeira parte foi realizada em diversos projetos da empresa, localizados no Sul da Bahia, Norte do Espírito Santo e Noroeste de Minas Gerais, já a segunda parte foi desenvolvida em um projeto denominado “Projeto T734 – Maria Mirreis”, localizado no município de Caravelas, Extremo-Sul da Bahia. Este projeto possui área total de 664,42 ha, sendo que em cerca de 57

ha foi iniciado o processo de restauração (Base de vegetação, fechamento de outubro de 2016 – Fibria Celulose).

Anteriormente à restauração, as áreas de APP e RL da empresa eram classificadas como pasto, pasto sujo ralo ou pasto sujo denso, de acordo com a intensidade de indivíduos regenerantes nativos existentes. Nas áreas com regeneração mais intensa, foi empregada a metodologia de restauração denominada condução da regeneração natural, enquanto nas áreas de pasto foi empregado o plantio de mudas nativas de diversidade e preenchimento. Segundo Rodrigues et al. (2009), o grupo de preenchimento “é constituído por espécies que possuem bom crescimento e boa cobertura de copa, proporcionando o rápido fechamento da área plantada”, já o grupo de diversidade incluem-se as espécies de crescimento lento e/ou baixa cobertura de copa, espera-se que estas irão gradualmente substituir as do grupo de preenchimento quando as mesmas entrarem em senescência, garantindo a sucessão ecológica na área restaurada. Além das áreas acima citadas, a empresa possui áreas que anteriormente ao processo de restauração eram povoamentos de eucalipto que foram eliminados quando a área foi convertida para preservação. Nestes casos, a única metodologia empregada foi o corte ou anelamento do eucalipto.

De acordo com a classificação de Veloso et al. (1991), na área de abrangência da Fibria nos estados anteriormente mencionados predomina a Florestas Ombrófila Densa, encontrada frequentemente revestindo tabuleiros plio-pleistocênicos do Grupo Barreiras. Como ecossistemas associados podemos citar alagados, brejos, manguezais, restingas e muçunungas, estas últimas por ora parecendo endêmicas do Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia (ARAUJO et al., 2008; SARCINELLI, 2010; SAPORETTI, 2012). Segundo a classificação de Köppen, a região se enquadra na transição entre o clima Af, clima tropical quente e úmido no litoral (ZONETE et al., 2010), Am, tropical de monção no interior e Aw, tropical úmido (com estação chuvosa no verão e seca no inverno) (MARTINS et al., 2010; EMBRAPA, 2000).

2.2 - Determinação de valores de referência para densidade e riqueza de regenerantes

Para a recomendação de valores de referência para os indicadores densidade e riqueza de regenerantes, utilizou-se um banco de dados de monitoramento ecológico, obtido pela Fibria em parceria com a TNC (The Nature Conservancy). Foram mensurados em campo a riqueza e o número de indivíduos de pequeno porte (0,5 a 1,5 m) em 263 parcelas de 100 m², situadas em vários projetos da empresa.

Utilizou-se o limite mínimo de 70% de cobertura de copa para a realização do monitoramento ecológico (fase II) da área conforme preconizado pelo Pacto pela Restauração da Mata Atlântica. Desta forma, as parcelas foram distribuídas somente nos talhões que apresentavam mais de 70% de cobertura de copa e que foram implantados há cerca de 5 anos por meio das metodologias de plantio de espécies nativas e condução da regeneração natural, e em áreas de retirada do eucalipto, onde foi realizado seu controle há cerca de 15 a 20 anos.

Para análise dos dados foi utilizada a estatística de percentil e aferiu-se a média e o desvio-padrão dos dados localizados entre os quartis (Q25 - Q75). Com o uso da média foi possível sugerir valores de referência para os indicadores descritos acima, de acordo com o tempo de implantação das áreas e considerando as áreas de retirada de eucalipto como fragmentos de referência na região, uma vez que já apresentavam bom desenvolvimento do sub-bosque que havia sob os plantios.

2.3 - Monitoramento da cobertura do solo e geração de recomendação de manejo adaptativo

Para monitorar o indicador cobertura do solo, utilizou-se imagens aéreas de alta resolução do Projeto T734, provenientes de câmeras a bordo de VANT e de uma composição de dados LIDAR, previamente classificadas pelos algoritmos MaxVer e RF.

O indicador de cobertura do solo foi classificado em cobertura de copa, solo exposto e cobertura por gramíneas (Tabela 1). Estas classes foram selecionadas considerando a possibilidade de obtenção de resultados a partir de análise de imagens aéreas de alta resolução, a importância ecológica relacionada ao monitoramento nas fases iniciais do processo de restauração e a relevância para

geração de recomendações de manejo adaptativo, que visam corrigir a trajetória de uma área de restauração possibilitando sua sucessão ecológica. Os valores de referência para cobertura de copa foram baseados no Pacto pela Restauração da Mata Atlântica (2013), o de cobertura por gramíneas é padrão da Fibria para decisão sobre controle de matocompetição, e a cobertura por solo exposto foi definida de modo a priorizar áreas de maior relevância para o controle do processo erosivo.

As classes foram mensuradas nos talhões definidos para monitoramento, escolhidos em função do tempo decorrido desde sua implantação, que de acordo com procedimento interno da Fibria pode variar de quatro a seis anos (FIBRIA CELULOSE S.A., 2016). Para valores de cobertura de copa inferiores a 70%, a área teria como recomendação principal seu plantio de adensamento com mudas de espécies nativas e atividades de manutenção como capinas e coroamento, quando a ocorrência de gramíneas invasoras a partir de certo grau de infestação.

Tabela 1 - Indicadores selecionados para monitoramento da restauração com VANT e LIDAR, e classificação definida conforme valores da classe dos indicadores

Classe	Valor de referência	Classificação
Cobertura de copa	0 - 59%	Necessidade de intervenção
	60 - 69%	Verificar necessidade de intervenção mediante análise conjunta com outros indicadores
	≥ 70 %	Adequada
Cobertura por solo exposto	0 – 0,09 ha	Adequada
	≥ 0,1 ha	Necessidade de intervenção
Cobertura por gramíneas	0 - 35%	Adequada
	≥ 35%	Necessidade de intervenção

Por meio das imagens classificadas, foi possível determinar a área representada por cada classe de cobertura do solo, em m² e em porcentagem, utilizando-se o *software* ArcGIS (ESRI, 2015). Elaborou-se um sistema especialista, baseado em condições, para gerar recomendações de manejo adaptativo através da linguagem Phyton. Ainda com o *software*, foi possível elaborar um *model builder* capaz de gerar tabelas contendo a área da classe em m² e em %, o código dos talhões e as recomendações de manejo adaptativo.

Por fim, comparou-se os resultados obtidos através das tabelas de recomendações geradas a partir de imagens temáticas previamente classificadas pelos diferentes algoritmos, utilizando estatística descritiva. A Figura 1 contém um fluxograma demonstrando a metodologia utilizada para a geração de recomendação de manejo adaptativo.

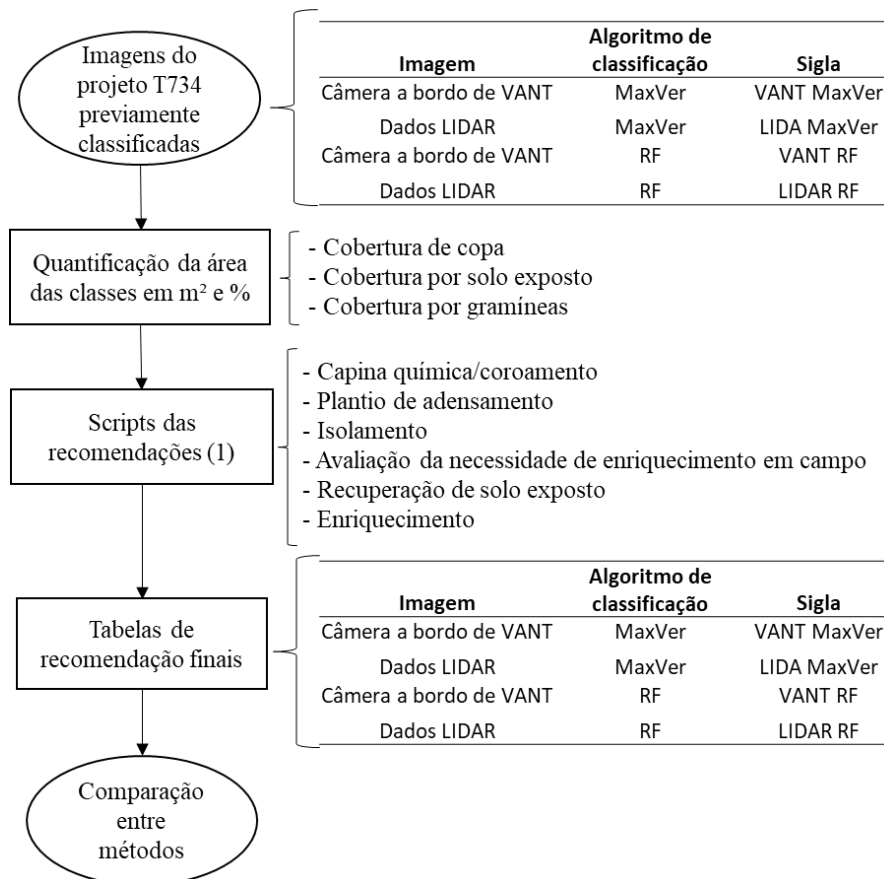


Figura 1 - Fluxograma representando a metodologia utilizada para a geração das recomendações a partir das diferentes imagens já classificadas. VANT: Veículo Aéreo Não Tripulável, LIDAR: *Light Detection and Ranging*, MaxVer: Máxima verossimilhança, RF: *Random Forest*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Determinação de valores de referência para densidade e riqueza de regenerantes

A avaliação de indicadores relacionados à regeneração natural de áreas em processo de restauração é de grande importância pois a regeneração faz parte do ciclo de crescimento da floresta, desde a fase inicial até seu estabelecimento

(BRANCALION et al., 2012; MARANGON et al., 2008). O estudo destes indicadores possibilita prever o comportamento e desenvolvimento futuro da floresta, já que apontam parâmetros como o número de espécies e a densidade de indivíduos que compõe o seu estoque, e também sua distribuição na área (GAMA et al., 2002).

Na Tabela 2 são apresentados os quartis e a média dos dados que foram utilizados para se definir os valores de referência para os indicadores de densidade e riqueza de regenerantes, já a Tabela 3 demonstra os valores de referência sugeridos para tais indicadores de acordo com a região estudada.

Tabela 2 - Estatísticas utilizadas para determinação dos valores de referência dos indicadores de densidade e riqueza de regenerantes arbóreos e arbustivos nativos para áreas de restauração com diferentes idades e métodos nos estados de Minas Gerais, do Espírito Santo e da Bahia

Indicador	Quartil	Plantio de nativas ou condução da regeneração natural- 5 anos	Retirada de eucalipto - 15 a 20 anos
Densidade de regenerantes (indivíduos/ha)	Q25	200	900
	Média	940,54	1700
	Q75	1.800	2.600
Riqueza de regenerantes (Espécies/parcela)	Q25	1	3
	Média	2,19	4,35
	Q75	4	6

Tabela 3 - Valores de referência sugeridos para os indicadores de densidade e riqueza de regenerantes arbóreos e arbustivos nativos para áreas de restauração com diferentes idades e métodos nos estados de Minas Gerais, do Espírito Santo e da Bahia

Indicador	Valores de referência sugeridos		Classificação
	Plantio de nativas ou condução da regeneração natural - 5 anos	Retirada de eucalipto -15 a 20 anos	
Densidade de regenerantes (Indivíduos/ha)	< 940 indivíduos	< 1.700 indivíduos	Necessidade de intervenção
	≥ 940 indivíduos	≥ 1.700 indivíduos	Adequado
Riqueza de regenerantes (Espécies/parcela*)	< 3 espécies	< 5 espécies	Necessidade de intervenção
	≥ 3 espécies	≥ 5 espécies	Adequado

*Para avaliação em nível de projeto, deve ser considerada a média da riqueza de regenerantes encontrada em todas as parcelas de 100 m² amostradas naquela área.

Nas áreas onde houve a retirada do eucalipto, os valores de referência encontrados são superiores aos das áreas implantadas por meio dos métodos de plantio e condução da regeneração natural (Tabela 3). O fato das áreas de retirada do eucalipto serem mais antigas, tendo sido implantadas por meio do corte ou anelamento do eucalipto há cerca de 15 a 20 anos, explica em grande parte esses valores. Os povoamentos de eucalipto podem ser considerados como catalizadores de restauração florestal, facilitando a regeneração natural da vegetação nativa através do estímulo à germinação e estabelecimento de plântulas, do desenvolvimento de camada de serapilheira e húmus, da supressão de gramíneas invasoras e do fornecimento de habitat para dispersores de sementes (VIANI, 2010), ou seja, se comportando como as espécies pioneiras quando se encontram em condições naturais (TABARELLI et al, 1993). Por outro lado, as áreas de restauração implantadas há cinco anos constituíam, em sua maioria, áreas de pastagem degradada, com presença de gramíneas agressoras, como a braquiária (*Urochloa decumbens*), dificultando o desenvolvimento de indivíduos regenerantes.

Muitos trabalhos determinam valores de referência elevados para indicadores relacionados a regenerantes em áreas em processo de restauração, e acabam por generalizar diferentes situações, sem o conhecimento prévio da

realidade local, como por exemplo sobre o potencial de regeneração das áreas, a matriz na qual estão inseridas e o histórico de degradação da área. De acordo com estudos de potencial de auto-regeneração realizados por Martins et al. (2014) no estado do Espírito Santo, encontrou-se baixo potencial de regeneração para a região Norte do estado, nas áreas de abrangência da Fibria, isto pode justificar o baixo valor de referência encontrado para riqueza de regenerantes em ambas situações. Contudo, estes valores podem ter sido subestimados em função da proporção de indivíduos não identificados (28%) no trabalho de amostragem em campo, indicando a necessidade de se aprofundar mais no estudo deste indicador.

Desta forma, o uso de dados mensurados em campo que representam diversas situações nas quais determinada instituição se enquadra pode ser uma solução trivial para determinar valores de referência de forma generalizada para projetos de restauração em larga escala.

3.2 - Monitoramento da cobertura do solo e geração de recomendações de manejo adaptativo

Foi definido um fluxograma de tomada de decisão para as recomendações de manejo adaptativo, realizado previamente à elaboração dos scripts (Figura 2). Nele é possível observar os indicadores escolhidos para monitoramento de áreas em processo de restauração, seus respectivos valores de referência e as recomendações geradas para cada situação.

O fluxograma foi elaborado partindo do princípio de que acima de 70% de cobertura de copa ocorre uma efetiva estruturação do dossel, influenciando na quantidade de luz que entra na floresta, na infiltração da água, no desenvolvimento de plântulas e no controle de gramíneas indesejáveis (MELO, 2010), tornando a evolução da área mais independente da intervenção humana. Para essas áreas já bem recobertas, a recomendação sugerida foi a análise da necessidade de enriquecimento em campo, onde se deve avaliar a densidade e a riqueza de indivíduos arbóreos e arbustivos nativos regenerantes. Esta medida deve reduzir os custos associados ao monitoramento, já que não será necessário mensurar esses indicadores em todas as áreas, mas apenas naquelas com cobertura de copa superior a 70%, que se enquadram na fase II do Protocolo do Pacto pela Restauração da Mata Atlântica (2013).

A avaliação das gramíneas invasoras, nos estágios iniciais do processo de restauração florestal, é considerada de alto grau de importância. Isto porque estas espécies competem com as mudas de espécies nativas plantadas, impedindo ou dificultando seu crescimento (RODRIGUES et al., 2009; RESENDE e LELES, 2017) e se alastrando de forma rápida (BRANCALION et al., 2012; RESENDE e LELES, 2017). Altas coberturas por gramíneas são indicativos de invasão, e estas precisam ser controladas. No caso de áreas com solo exposto considerou-se que, quando encontrado em manchas maiores, se faz necessário recuperar as camadas superficiais do solo para reduzir a erosão e seus impactos aos recursos hídricos. De acordo com o estudo realizado por Mendonça et al. (2009), em áreas de solo exposto no Ceará, encontrou-se menor conteúdo de matéria orgânica, umidade e capacidade de infiltração que nos demais usos do solo na região, possibilitando a redução da recarga de aquíferos bem como a redução da vazão dos rios e assoreamento dos mesmos.

O isolamento e abandono da área (restauração passiva) foi recomendado em duas situações: i) quando o talhão estiver com 60 a 70% de cobertura de copa, de modo a aguardar o próximo monitoramento antes da necessidade de se proceder a plantios de adensamento; ii) quando a área já possuir cobertura de copa, densidade e riqueza de regenerantes adequada. Este último caso é definido como abandono, pois a partir dele, pode ocorrer a interrupção temporária ou permanente de regimes de manejo adaptativo (ARONSON, 2011). Sempre que a área possuir menos de 60% de cobertura de copa, o plantio de adensamento será sugerido. Este consiste em introduzir espécies nativas regionais do grupo de preenchimento nos trechos onde não ocorreu desenvolvimento das mudas plantadas (RODRIGUES et al., 2011). O plantio de enriquecimento será recomendado nos casos onde houver baixa riqueza em áreas já bem recobertas (> 70% de cobertura de copa), visando aumentar a biodiversidade da área de restauração e possibilitar sua sucessão florestal.

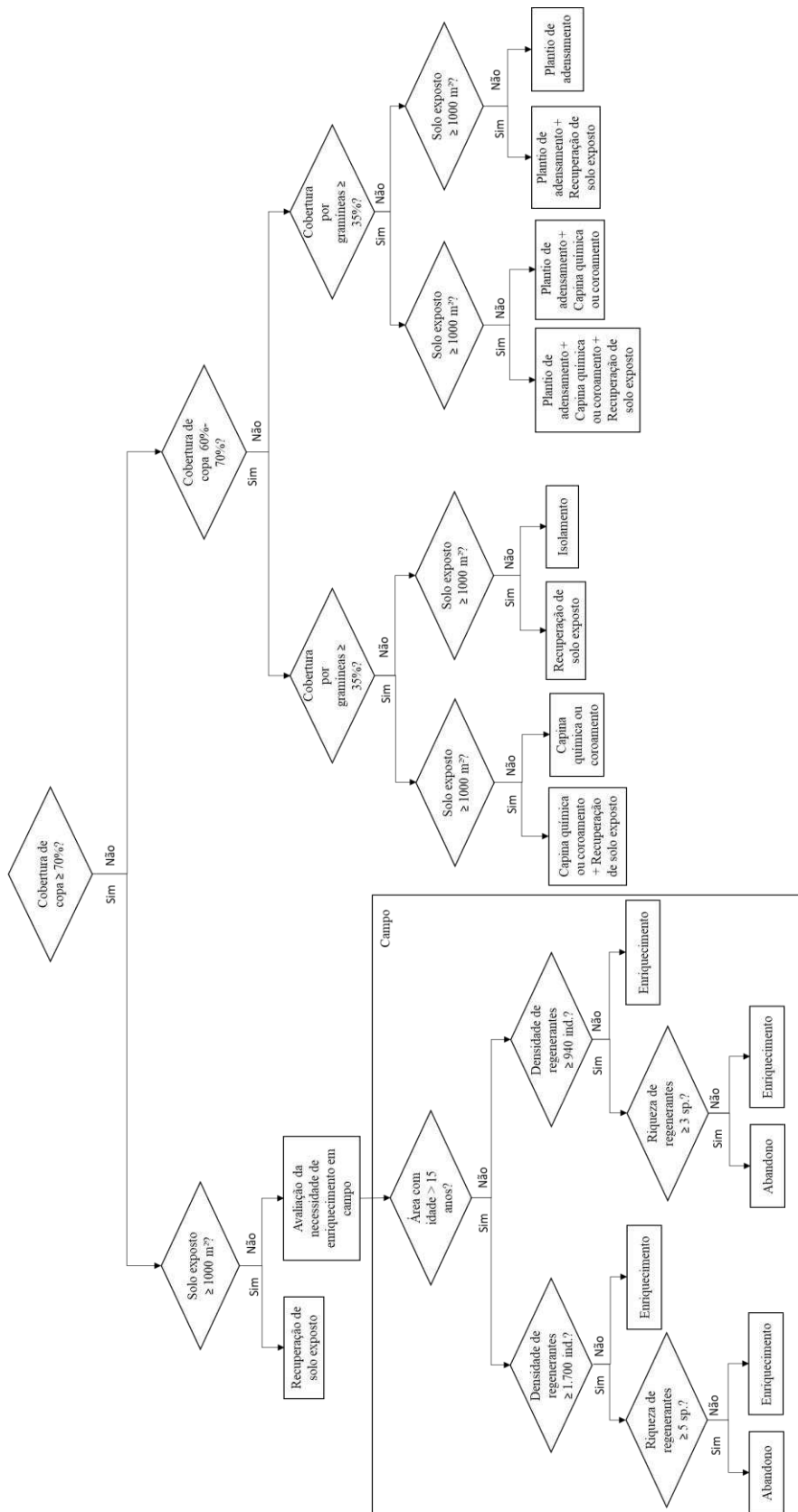


Figura 2 - Fluxograma de tomada de decisões a partir de valores de referência de indicadores, para geração de recomendações de manejo adaptativo. ind.: indivíduos, sp.:espécie.

Não foi verificada muita variação na área total das classes avaliadas, sendo que a imagem proveniente da composição de dados LIDAR classificada com algoritmo RF foi a que mais divergiu das demais (Figura 3). Essas ligeiras variações entre as classificações podem estar associadas à presença de áreas sombreadas, classificadas como áreas escuras nas imagens de câmera acoplada a VANT, o que não ocorre com as imagens de dados LIDAR, que não são afetadas pela presença de nuvens ou objetos que fazem sombras, e também por pixels classificados erroneamente. Além disso, analisando-se o projeto como um todo, em todos os métodos avaliados, a quantidade de gramíneas e a cobertura de copa foram bastante similares, e elevadas indicando maior probabilidade de gerar mais recomendações associadas a essas classes.

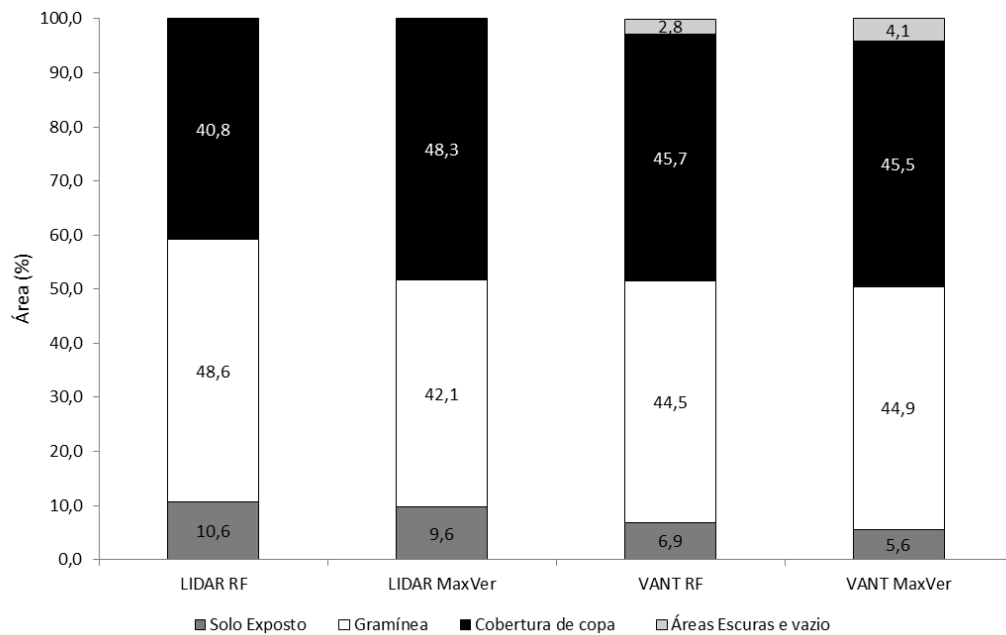


Figura 3 - Área (%) das classes de solo exposto, gramínea e cobertura de copa encontradas a partir dos diferentes métodos de classificações de imagens, dados de *Light Detection and Ranging* (LIDAR) com algoritmo *Random Forest* (RF), dados *Light Detection and Ranging* (LIDAR) com algoritmo da Máxima Verossimilhança (MaxVer), imagens de câmera a bordo de Veículo Aéreo Não-Tripulável (VANT) com algoritmo *Random Forest* (RF), Veículo Aéreo Não-Tripulável (VANT) com algoritmo da Máxima Verossimilhança (MaxVer).

Observando-se as Figuras 3 e 4, foi possível perceber que a pequena variação na área total das classes avaliadas para os diferentes métodos, influenciou na geração de recomendações de manejo adaptativo (Figura 4). Estas diferenças podem estar relacionadas ao processo de classificação de imagens. As recomendações que cobrem maiores áreas do projeto T734 foram coroamento/capina e plantio de adensamento; e coroamento/capina e adensamento e recuperação de solo exposto, que representam em média 34% e 29% das recomendações geradas. Isto pode ser explicado pela metodologia de plantio que foi utilizada, com espécies de preenchimento e diversidade. Esta metodologia pode não ter sido adequada a esta situação, pois ocasionou grande mortalidade de mudas, sobretudo de diversidade, já que estas têm menor tolerância à competição por gramíneas nos estágios iniciais da restauração. Para áreas que apresentaram recomendação de recuperação de solo exposto seria interessante o uso de outras metodologias para acelerar o processo de recuperação, como por exemplo, o plantio de adubos verdes associados a mudas nativas ou uso de lodo de esgoto nos plantios, que aceleram o equilíbrio químico e físico do solo, tornando o ambiente mais favorável para o estabelecimento das espécies nativas (AGUIAR et al. 2000; KITAMURA et al., 2008).

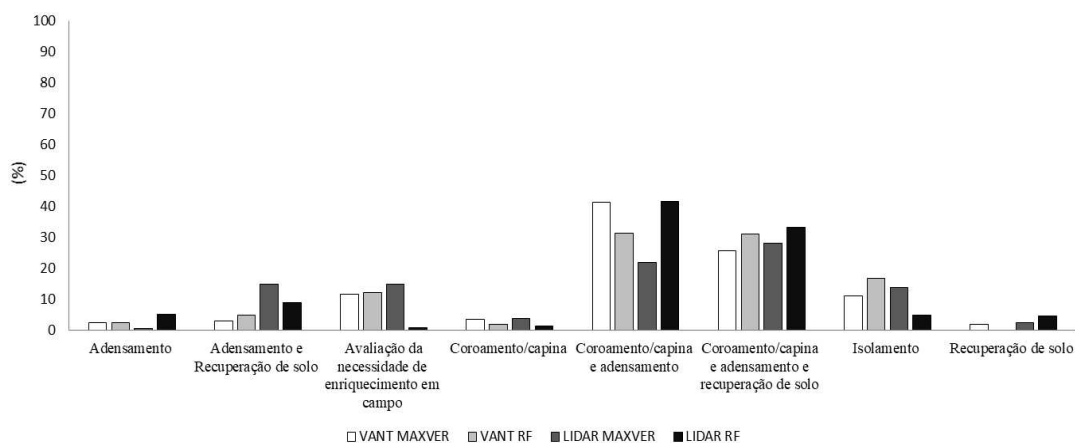


Figura 4 - Porcentagem de área definida para cada recomendação de manejo adaptativo, de acordo com diferentes métodos de monitoramento, imagens de LIDAR (*Light Detection and Ranging*) e VANT (Veículo Aéreo Não Tripulável), classificadas através dos algoritmos MaxVer (Máxima Verossimilhança) e RF (*Random Forest*).

A imagem proveniente da composição de dados LIDAR classificada com o algoritmo RF apresentou menor cobertura de copa (Figura 3), desta forma obteve menos recomendações associadas a análise da necessidade de enriquecimento campo e isolamento (Figura 4). Esta mesma classificação também apresentou maior cobertura por gramíneas e solo exposto quando comparada as outras, o que gerou mais recomendações relacionadas a capina/coroamento e adensamento; coroamento/capina e adensamento e recuperação de solo exposto; e recuperação de solo exposto e adensamento.

Quando se avaliou a sobreposição de recomendações nos talhões para os quatro métodos estudados, identificou-se que apenas 32% deles obtiveram exatamente a mesma recomendação. Entretanto, quando essa sobreposição ocorreu somente entre a imagem de VANT MaxVer e VANT RF, encontrou-se maior coincidência de recomendações (86%), já os métodos LIDAR RF e VANT MaxVer foram os que menos coincidiram (48%). Isto demonstra que a escolha do método de obtenção da imagem e o classificador influenciam na recomendação final gerada. Além disso, para todos os métodos avaliados, a recomendação que mais teve coincidência foi também coroamento/capina e adensamento, fortalecendo a hipótese da necessidade deste tipo de intervenção na maior parte das áreas deste projeto. A escolha de um método de classificação em detrimento do outro pode acarretar em maiores recomendações de plantios de adensamento, e consequentemente maiores custos associados ao manejo adaptativo.

4. CONCLUSÕES

A escolha de indicadores para avaliar áreas em processo de restauração e a definição de seus respectivos valores de referência continua sendo um desafio para monitoramento das áreas em processo de restauração. Este trabalho propõe uma forma de monitoramento com base em indicadores de rápida mensuração, baixo custo e que representem de forma clara a real situação das áreas avaliadas, bem como uma forma de determinação de valores de referência com base na dinâmica de áreas de restauração presentes na região do estudo.

A definição de valores de referência de densidade e riqueza de regenerantes arbóreos e arbustivos nativos visam facilitar a tomada de decisão relativa à realização de ações de restauração adicionais em áreas já bem recobertas, sobretudo

como plantios de enriquecimento, visando ao incremento da diversidade de espécies nos projetos de restauração. Os valores de referência encontrados para os indicadores de densidade e riqueza refletem o baixo potencial de regeneração da região e o histórico de degradação associado ao uso intensivo do solo pela agricultura e pecuária previamente aos plantios de eucalipto e abandono das áreas de preservação. Desta forma, estes valores representam a realidade na qual as áreas em processo de restauração estão inseridas.

O sistema especialista desenvolvido neste estudo se mostrou eficiente, principalmente pelo fato de ser um método que gera resultados de forma rápida e precisa e possibilitando a redução de custos associados ao trabalho de campo, sobretudo para áreas muito extensas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A.V.; SILVA, A.M.; MORAES, M.L.T.; FREITAS, M.L.M.; BORTOLOZO, F.R. Implantação de espécies nativas para recuperação de áreas degradadas em região de Cerrado. In: Simpósio Nacional de Recuperação de Áreas Degradadas, Blumenau. **Anais. Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas**, Fundação Universidade Regional de Blumenau, 2000.

ARAÚJO, D.S.D.; PEREIRA, O.J.; PEIXOTO, A.L. Campos Nativos at the Linhares Forest Reserve, Espírito Santo, Brazil. In: Thomas, W. (ed.). *The Atlantic Coastal Forest of Northeastern Brazil. Memoirs of the New York Botanical Garden*, v. 100, p. 365-388, 2008.

ARONSON, J.; DURIGAN, G.; BRANCALION, P.H.S. Conceitos e definições correlatas à ciência e à prática da restauração ecológica. **Instituto Florestal Série Registros**, v. 44, p. 1-38, 2011.

BRANCALION, P.H.S.; VIANI, R.A.G.; RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. In: MARTINS, S.V. (Org.). **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**, Editora UFV, Viçosa, MG, Brasil v. 1, p. 262-293, 2012.

BRASIL. Lei Federal n.º 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre O Novo Código Florestal. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 25 maio 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm>. Acesso em: 22 jan. 2017.

BRASIL. Decreto nº 8.972, de 23 de janeiro de 2017. Institui a Política Nacional de Recuperação de vegetação Nativa – Proveg. **Diário Oficial [da] República**

Federativa do Brasil, Brasília, DF, 23 de janeiro de 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Decreto/D8972.htm>. Acesso em: 19 abr. 2017.

DURIGAN, G.; RAMOS, V. S. **Manejo Adaptativo: primeiras experiências na Restauração de Ecossistemas**. Páginas & Letras Editora e Gráfica, São Paulo, SP, Brasil, 49 p., 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Levantamentos generalizado e semidetalhado de solos da Aracruz Celulose S. A. no Estado do Espírito Santo e no extremo sul do Estado da Bahia e sua aplicação aos plantios de eucalipto**. Rio de Janeiro, 2000. Parte 3.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS for Desktop**. Versão 10.3. Redlands, Califórnia, Estados Unidos, 2015.

FIBRIA CELULOSE S.A. **Manual de Restauração Ambiental**. 2016.

GAMA, J. R. V.; BOTELHO, S. A.; BENTES-GAMA, M. M. Composição florística e Estruturada regeneração natural de floresta secundária de Várzea Baixa no Estuário Amazônico. **Revista Árvore**, v.26, n.5, p.559-566, 2002.

KITAMURA, A. E.; ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; PAZ CONZALEZ, A. Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 1, p. 405-416, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/10211>>. Acessado em: 31 mai. 2017.

LOPES, M. H. B. D. M.; HIGA, R. Desenvolvimento de um sistema especialista para identificação de diagnósticos de enfermagem relacionados com a eliminação urinária. **Revista Brasileira de Enfermagem**, v. 58, n. 1, p. 27-32, 2005.

MARANGON, L. C.; SOARES, J. J.; FELICIANO, A. L. P.; BRANDÃO, C. F. L. S. Regeneração natural em um fragmento de floresta estacional semidecidual em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 32, n. 1, 2008.

MARTINS, S. G.; AVANZI, J. C., SILVA, M. L. N.; CURI, N.; NORTON, L. D.; FONSECA, S. Rainfall erosivity and rainfall return period in the experimental watershed of Aracruz, in the coastal plain of Espírito Santo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 999-1004, 2010.

MARTINS, S. V.; SARTORI, M.; RAPOSO FILHO, F. L.; SIMONELI, M.; DADALTO, G.; PEREIRA, M. L.; SILVA, A. E. S. **Potencial de regeneração**

natural de florestas nativas nas diferentes regiões do estado do Espírito Santo. Vitória: ES. Centro de desenvolvimento do agronegócio. p.101, 2014.

MELO, A.C.G.; REIS, C.M.; RESENDE, R.U. Guia para Monitoramento de Reflorestamentos para Restauração. **Circular Técnica 1 Projetos Mata Ciliar**, São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, n. 1, 10 p. 2010.

MELO, F.P.L.; PINTO, S.R.R.; BRANCALION, P.H.S.; CASTRO, P.S.; RODRIGUES, R.R.; ARONSON, J.; TABARELLI, M. Priority setting for scaling-up tropical forest restoration projects: early lessons from the Atlantic Forest Restoration Pact. **Environmental Science and Policy**, v. 33, p. 395–404, 2013.

MENDES, R. D. Inteligência artificial: sistemas especialistas no gerenciamento da informação. **Ciência da Informação**, v. 26, n. 1, 1997.

PACTO PELA RESTAURAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA. **Protocolo de Monitoramento para Programas e Projetos de Restauração Florestal**. 2013. Disponível em: <http://media.wix.com/ugd/5da841_c228aedb71ae4221bc95b909e0635257.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2016.

RESENDE, A. S.; LELES, P.S. O problema do controle de plantas daninhas na restauração florestal. In: RESENDE, A. S.; LELES, P. S. **Controle de plantas daninhas em restauração florestal**. Embrapa, Brasília, p. 13-25, 2017.

RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. (Orgs.) **Pacto para a restauração ecológica da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: Instituto BioAtlântica, p.55-61, 2009.

RODRIGUES, R.R.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G.; ARONSON, J.; BARRETO, T. E.; VIDAL, C. Y.; BRANCALION, P. H. Large-scale ecological restoration of high diversity tropical forests in SE Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 1605-1613, 2011.

RUIZ-JAEN, M.C.; AIDE, T.M. Restoration Success: How is it being measured? **Restoration Ecology**, v. 13, 569–577, 2005.

SAPORETTI JUNIOR, A.W.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SOUZA, A.L.; SOARES, M.P.; ARAÚJO, D.S.D.; MEIRA-NETO J.A.A. Influence of soil physical properties on plants of Mussununga ecosystem, Brazil. **Folia Geobot**, v. 47, p. 29-39, 2012.

SARCINELLI, T.S. **Muçunungas: enclaves de vegetação arenícola na Floresta Atlântica de Tabuleiro**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG: UFV. 186 p. , 2010.

SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION INTERNATIONAL – SER. **The SER primer on ecological restoration**. Society for Ecological Restoration International, Science and Policy Working Group, 2004. Disponível em: < <http://www.ser.org/>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

TABARELLI, M.; VILLANI, J. P.; MANTOVANI, E. A recuperação da floresta atlântica sob plantios de Eucalyptus no núcleo Santa Virgínia, SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 187-201, 1993.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 124 p., 1991.

VIANI, R. A. G.; DURIGAN, G.; DE MELO, A. C. G. A regeneração natural sob plantações florestais: desertos verdes ou redutos de biodiversidade?. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 3, p. 533-552, 2010.

ZAHAWI, R.A.; DANDOIS, J.P.; HOLL, K.D.; NADWODNY, D.; REID, J. L.; ELLIS, E. C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. **Biological Conservation**, v. 186, p. 287-295, 2015.

ZONETE, M.F.; RODRIGUEZ, L.C.E.; PACKALÉN, P. Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 86, p. 225-235, 2010.

CONCLUSÕES GERAIS

Os métodos propostos para monitoramento de áreas em processo de restauração e posterior geração de recomendação de manejo adaptativo se mostraram eficientes, sobretudo para monitorar áreas extensas, trazendo ganhos em qualidade e precisão, análise sinóptica e redução dos esforços de campo.

O *Random Forest* é o algoritmo mais adequado para classificação de imagens provenientes de câmera a bordo de VANT e de uma composição de dados LIDAR, quando objetiva-se monitorar áreas em processo de restauração.

Os valores de referência encontrados para os indicadores de densidade e riqueza de regenerantes refletem o baixo potencial de regeneração da região e o histórico de degradação associado ao uso intensivo do solo pela agricultura e pecuária. Desta forma, estes valores representam a realidade na qual as áreas em processo de restauração estão inseridas

O método elaborado e discutido neste trabalho é considerado promissor para monitorar áreas de restauração e pode ser replicado e adaptado por outras iniciativas públicas e privadas.