

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE

DIOGO OTÁVIO SCALIA PEREIRA

**AVALIAÇÃO DE IMAGENS SENTINEL-2 NA DETECÇÃO DA
INFRAESTRUTURA DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL EM CORTE SELETIVO
ATRAVÉS DE DIFERENTES TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

**RIO BRANCO
ACRE – BRASIL
MAIO – 2019**

DIOGO OTÁVIO SCALIA PEREIRA

AVALIAÇÃO DE IMAGENS SENTINEL-2 NA DETECÇÃO DA INFRAESTRUTURA
DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL EM CORTE SELETIVO ATRAVÉS DE DIFERENTES
TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Acre, como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção
do título de Mestre em Ciência Florestal.

RIO BRANCO
ACRE – BRASIL
MAIO – 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

P436a Pereira, Diogo Otávio Scalia, 1987 -

Avaliação de imagens sentinel-2 na detecção da infraestrutura de exploração florestal em corte seletivo através de diferentes técnicas de sensoriamento remoto / Diogo Otávio Scalia Pereira; orientador: Dr. Irving Foster Brown. – 2019.

30 f.: il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós – Graduação em Ciência Florestal, Mestre em Ciência Florestal, Rio Branco, 2019.

Inclui referências bibliográficas e apêndices.

1. Manejo florestal sustentável. 2. Exploração madeireira. 3. Técnicas de processamento digital. I. Brown, Irving Foster (orientador). II. Título.

CDD: 634



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação/Centro de Ciências Biológicas e da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal

ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
FLORESTAL, MESTRANDO: **DIOGO OTÁVIO SCALIA
PEREIRA**, REALIZADA NO DIA TRINTA E UM DE MAIO DE
2019.

Às dez horas do dia trinta e um do mês de maio do ano de 2019, sala 02 do Bloco de Doutorado em Produção Vegetal (térreo), da Universidade Federal do Acre, realizou-se a Defesa de Dissertação intitulada: **“AVALIAÇÃO DE IMAGENS SENTINEL-2 NA DETECÇÃO DA INFRAESTRUTURA DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL EM CORTE SELETIVO ATRAVÉS DE DIFERENTES TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO”**, de autoria do mestrando: **Diogo Otávio Scalia Pereira**, discente do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de Mestrado (UFAC). Na ocasião, a Comissão Examinadora esteve constituída pelos membros: **Dr. Irving Foster Brown (Presidente/Parque Zoobotânico); Dr^a. Symone Maria de Melo Figueiredo (CCBN/UFAC); Dr^a. Karla da Silva Rocha (CFCH/UFAC); Dr^a. Sonaira Souza da Silva (Suplente/UFAC, Cruzeiro do Sul)**. Após a exposição oral, houve arguição pelos examinadores e ao final da arguição, reaberta a sessão pública, o discente foi considerado aprovado pela Comissão Examinadora. E para constar, foi lavrada a presente ata, que será assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Dr. Irving Foster Brown
(Presidente/Parque Zoobotânico)

Dr^a. Symone Maria de Melo Figueiredo
(CCBN/UFAC)

Dr^a. Karla da Silva Rocha
(CFCH/UFAC)

Ao “vô Arthur”,
(*in memorian*)

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Thaís; ao meu pai, Fernando; à minha outra eu, Fernanda; ao Pai.

À Superintendência da Polícia Federal do Acre, que agradeço em nome de sua dirigente atual, Delegada Diana Calazans Mann. Ao Leandro Barcelos, pela compreensão. Aos meus honrosos e guerreiros colegas do SETEC/AC. Ao colega APF Caio Belo pela ajuda, na pessoa de quem agradeço à equipe T&D da SR/PF/AC. Ao meu irmão Celso Coelho.

Ao Rafael Strapason, pela humildade e deferência, a quem elogio à Secretaria de Estado e do Meio Ambiente do Acre (SEMA), instituição a qual também agradeço por possibilitar a pesquisa.

Ao apoio e ajuda de três amigas e profissionais maravilhosas: Maria Tereza, Fabrícia Mota e Olívia Bueno. Ao Rodrigo Ribeiro e à Pamela Thuyany por ajudarem e apoiarem ao longo da construção bibliográfica.

Aos colegas de turma, Arnaldo Melo, Cleverson Carvalho, Elaine Dutra, Jamila Farias, Jamile Tanomaru e José Renato, por compartilharem a jornada. À Tida e à Kelly Yarzon, por serem pontos de luz. Ao meu amigo Kemmil Coelho, pela amizade e parceria.

Ao professor Dr. Eraldo Matricardi, por toda ajuda prestada e por me ser um norte como profissional e como pessoa. Ao professor e Dr. Foster Brown pelos ensinamentos todos, pela humildade e apoio.

À amada Tauvana da Silva Yung.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Análise de Componentes Principais
AMF	Área de Manejo Florestal
AUTEX	Autorização de Exploração
AUTOMCU	<i>Automated Monte Carlo Unmixing</i>
BOA	<i>Bottom of Atmosphere</i>
CCA	<i>Contextual Classification Algorithm</i>
CLAS	<i>Carnegie Landsat Analysis System</i>
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DETER	Detecção de Desmatamento em tempo Real
DA	Detecção de Anomalia
DOF	Documento de Origem Florestal
EIR	Exploração de Impacto Reduzido
EROS	<i>Earth Resources Observation and Science</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FEA	Floresta Estadual do Antimary
GEMI	<i>Global Environment Monitoring Index</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HA	Hectare
IF	Inventário Florestal
IMAC	Instituto de Meio Ambiente do Acre
IMAZON	Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia
IMGTOOLS	<i>Image processing Tools</i>
MC	Matriz de Confusão (ou Matriz de Erro)
MFS	Manejo Florestal Sustentável
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
MSAVI	Índice Modificado de Vegetação Ajustado ao Solo
MSI	<i>Multi-Spectral Instrument</i>
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
NDFT	<i>Normalized Difference Fraction Index</i>
NM	Nanômetros
PI	Proteção Integral
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável
POA	Plano de Operação Anual
PRODES	Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
RA	Reserva Absoluta
RXD	<i>Reed-Xiaoli Detector</i>
SEDENS	Secretaria de Desenvolvimento Florestal, da Indústria, do Comércio e dos Serviços Sustentáveis
SNAP	<i>Sentinel Application Platform</i>
TBAD	<i>Texture Segmentation Based Anomaly Detection Algorithm</i>
TOA	<i>Top of Atmosphere</i>
UC	Unidade de Conservação
UPA	Unidade de Produção Anual
US	Usos Sustentável
USGS	<i>U.S. Geological Survey</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de fluxo das etapas de processamento envolvidas na pesquisa.	4
Figura 2. Área de estudo disposta sobre o zoneamento da Floresta Estadual do Antimary (FEA) e sua localização no território brasileiro. Em lilás, a exploração ocorrida em 2017 (parte da UPA 04 e UPA 03-R); em verde, a exploração de 2018 (parte da UPA 05); o hachurado em azul demonstra a RA.	5
Figura 3. (A) Acurácia Geral, Coeficiente Kappa e Acurácia do Usuário p/ classes Estrada e Floresta; (B) Gráfico com Erro de Comissão e Omissão para a classe de Estrada. ...	11
Figura 4. Resultado do processo binário de classificação sobre os tratamentos aplicados na área de exploração de 2017 e Reserva Absoluta.	12
Figura 5. Resultado do processo binário de classificação sobre os tratamentos aplicados na área de exploração de 2018 e Reserva Absoluta.	12

AValiação DE IMAGENS SENTINEL-2 NA DETECÇÃO DA INFRAESTRUTURA DE EXPLORAÇÃO FLORESTAL E CORTE SELETIVO ATRAVÉS DE DIFERENTES TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Diogo Otávio Scalia Pereira¹

RESUMO

A floresta amazônica é fundamental para manutenção da biodiversidade, clima e recursos hídricos no Brasil e no continente. Apesar disso, ela segue sofrendo pressões antrópicas e perdendo área para a agropecuária e outros usos alternativos. Pode se considerar que a exploração madeireira é entendida como a primeira fronteira antrópica para com o meio ambiente natural florestal. No Brasil, tal exploração pode ser executada legalmente sob Plano de Manejo Florestal Sustentável, entretanto, ocorre ilegalmente na forma de corte seletivo. O monitoramento desta exploração é fundamental para a eficiente governança ambiental e se demonstra um desafio ao Estado que, atualmente, conta com poucos recursos humanos e poucos investimentos ambientais para monitorar tão vasto território. Visando auxiliar nesta tarefa – detecção tempestiva da exploração madeireira –, investigou-se o desempenho das imagens da missão Sentinel-2 na observação das feições típicas da exploração madeireira, buscando-se destacar, através de técnicas de processamento digital, a infraestrutura de exploração florestal (estradas e pátios) do Manejo Florestal Sustentável da Floresta Estadual do Antimary. Foram avaliadas, destacando a forma dendrítica da infraestrutura de exploração, seis abordagens de sensoriamento remoto, quais sejam: a simples utilização da imagem em composição RGB visível; a utilização da banda B4 (vermelho, 665 nm) separadamente; a imagem fração solo Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME); o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI); o Índice Modificado de Vegetação Ajustado ao Solo (MSAVI); e a Detecção de Anomalia RXD (DA) aplicada sobre o MLME. Foram realizadas análises qualitativas sob aspectos de interpretação visual e análises quantitativas submetidas a processo de classificação binário não-supervisionado e posterior confronto com a verdade de campo por Matriz de Confusão. Visualmente, a abordagem que mais destacou a infraestrutura de exploração florestal do contexto de fundo foi a DA, porém esse procedimento subestimou as estradas, observado pela interrupção da continuidade. As piores abordagens foram a utilização da Imagem Original e o MSAVI. Quantitativamente, em resposta ao classificador não supervisionado, o tratamento de maior sucesso foi o MLME, pois apresentou a melhor relação entre Erro de Omissão e Comissão – no parâmetro Acurácia do Usuário, obteve 98% de sucesso a classe referente às estradas e 70% para a classe referente à floresta. O satélite Sentinel-2, com sua resolução temporal de 5 dias e espacial de 10 metros, se projeta como hábil ferramenta para a atividade detecção e monitoramento do corte seletivo na Amazônia, sendo essa atividade aprimorada através dos processamentos digitais adequados, podendo, assim, instruir organismos públicos e privados com geoinformação precisa para a governança ambiental.

Palavras-Chave: Sensoriamento Remoto, Sentinel-2, Corte Seletivo, Exploração Madeireira.

¹ Mestrando em Ciências Florestais pela Universidade Federal do Acre. Perito Criminal Federal. E-mail: diogoscalia@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Embora a floresta amazônica seja de extrema importância para a vida da humanidade, estabilidade climática e conservação da biodiversidade, as áreas florestadas seguem ameaçadas (BARLOW et al., 2016). No Brasil, houve aumento de 13,72% no desmatamento do período de 2017-2018 em relação ao período 2016-2017, gerando perda de mais de 7.900 km² de floresta (INPE, 2004b; 2018). Assim, essas áreas desmatadas dão espaço a diversas outras atividades que por si só causam impactos ambientais.

Impactos como agropecuária e mineração resultam na remoção completa da cobertura vegetal, causando fragmentação florestal e seus problemas correlatos (LAURANCE; VASCONCELOS, 2009); porém, há atividades que se desenvolvem ainda com a manutenção parcial da floresta, como a exploração seletiva de madeira, onde somente árvores de valor comercial são retiradas, mas, ainda assim ocorrem intrínsecos e significativos impactos (MATRICARDI et al., 2007). As áreas com exploração seletiva apresentam aumento na incidência de incêndios (NEPSTAD et al., 1999; COCHRANE, 2001), danos colaterais relativos às mudanças no regime de luz e microclima, erosão e compactação do solo, quebra do ciclo de nutrientes, alteração na composição florística (ASNER et al., 2002) e aporte de carbono na atmosfera (NUMATA et al., 2010).

Comparando-se ao nível de escala, esses dois diferentes processos de intervenção antrópica na floresta amazônica – corte raso e corte seletivo – apresentam-se em equivalente magnitude, ao menos na Amazônia Legal brasileira (TYUKAVINA et al., 2017). Através de dados obtidos do setor madeireiro nacional, no ano de 1996 a área florestal alvo de exploração seletiva abrangeu entre 50% a 90% da área de desmatamento a corte raso e, ainda, demonstrouse que ambos distúrbios estão presentes na Amazônia brasileira na mesma ordem de grandeza: 10.000 a 15.000 km² em corte seletivo naquele ano (NEPSTAD et al., 1999). Paralelamente, o acesso por sensoriamento remoto estimou valores de mesma ordem nos anos de 1992, 1996 e 1999 – respectivamente, 5.980 km², 10.064 km² e 26.085 km² de área em corte seletivo (MATRICARDI et al., 2007).

Em convergência, um adicional levantamento revelou, para a Amazônia brasileira e entre os anos de 2000 a 2010, que a área de floresta degradada (corte seletivo somado a incêndios florestais) correspondeu a 30% da área desmatada e constatou, ainda, a tendência de aumento de degradação florestal enquanto, divergentemente, houve tendência de diminuição do desmatamento a corte raso (SOUZA et al., 2013). Em estudo mais recente, Tyukavina et al. (2017) também afirma que a taxa de desmatamento diminuiu a partir dos anos 2000, mas a taxa de corte seletivo não seguiu tal tendência.

No contexto da legalidade da exploração madeireira na Amazônia, em análise bibliográfica, estima-se que, entre os anos 2000 a 2004, no mínimo 40% do volume de madeira explorado na Amazônia brasileira teve origem ilegal (ASNER et al., 2009). De toda forma, a exploração madeireira é atividade difundida e importante para a economia amazônica, contudo, o setor sofre pela escassa governança ambiental por parte do Poder Público, pelo baixo investimento de capital e pela falta de aplicação das técnicas de manejo e ecologia florestal (PEREIRA et al., 2002). Ainda, fatores como direitos de propriedade parcaamente implementados, alto custo burocrático para aprovar os Planos de Manejo e as dificuldades em procedimentos de arrendamento de terra compõe outros aspectos que dificultam a implementação legal da exploração (PUTZ et al., 2001).

Observando-se o padrão de ocupação de solo na Amazônia brasileira, constata-se que os madeireiros, os quais geralmente se movem através da exploração seletiva ilegal, acabam por colonizar a área de forma “dendrítica” e abrem acessos na floresta para que, posteriormente, outros atores invadam essas áreas e causem desmatamento para atividade agropecuária (ARIMA et al., 2016). Ao encontro do afirmado, comprovou-se que a ocorrência de exploração seletiva em determinada área florestal aumenta a probabilidade de duas a quatro vezes em que

ali posteriormente incida o desmatamento completo; inclusive, em 16% ($\pm 1\%$) desses casos – em que o corte seletivo precede o corte raso –, a conversão ocorreu em até um ano após a exploração seletiva (ASNER et al., 2006).

Contextos espaciais como os citados, bem com o uso e ocupação do solo e as diversas alterações antrópicas na floresta amazônica são aspectos observados e mapeados por imagens de satélites e técnicas de sensoriamento remoto (XIE et al., 2008; GÓMEZ et al., 2016). Entretanto, a detecção do corte seletivo apresenta-se com mais dificuldades e nuances quando comparada à detecção do corte raso (ASNER et al., 2005; SOUZA et al., 2005), já que os procedimentos e produtos utilizados para o monitoramento do desmatamento a corte raso não requerem tanta sofisticação quanto os tratamentos para detecção do corte seletivo. Em regra, as imagens distribuídas gratuitamente possuem moderada ou grosseira resolução espacial, necessitando de processamento digital mais sofisticado para precisamente detectarem o corte seletivo (SOTHE et al., 2017).

No Brasil, o desflorestamento é oficialmente monitorado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), especificamente pelo Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES), o qual traz estimativas anuais de desmatamento com imagens Landsat (SHIMABUKURO et al., 2014; INPE, 2008; 2014). A degradação florestal é monitorada por um segundo programa, a Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER); este opera como espécie de alerta mapeando tanto o desmatamento quanto a degradação florestal, como a exploração seletiva e os incêndios florestais; para isso, são utilizadas imagens do sensor MODIS do satélite Terra, as quais possuem 250 metros de resolução espacial, e a validação é realizada com imagens Landsat (INPE, 2004a). Devido ao fato deste programa utilizar imagens de resoluções espaciais grosseiras, a detecção de mudanças mais sutis no dossel florestal fica impossibilitada pela própria natureza do sensor utilizado. Em fato, alterações menores que 25 hectares não são detectadas (INPE, 2004a).

Os sensores Landsat apresentam limitações para a detecção do corte seletivo. Suas imagens, as quais possuem 30 m de resolução espacial, só seriam capazes de detectar as cicatrizes de exploração florestal caso a degradação fosse intensa e a imagem obtida logo após a exploração; não possibilitam visualização clara das trilhas de arraste e clareiras; e estradas e pátios só seriam observáveis quando a abertura do dossel superasse 50%. Ainda, foi observado que, após um ano e meio da exploração, a visualização fica dificultada devido a regeneração natural (ASNER et al., 2002). Contudo, a constelação Landsat ainda é muito utilizada e apresenta ainda grande importância por permitir longas análises históricas devido ao fato de estar em operação por mais de quatro décadas.

Considerando a necessidade de se detectar o corte seletivo ilegal a tempo para a atuação governamental efetiva, de forma a evitar o desmatamento completo da área, e visando contornar a dificuldade de instituições/profissionais brasileiros em acessar imagens comerciais, indaga-se qual seria a melhor forma de se detectar o corte seletivo com as novas imagens Sentinel-2: imagens disponibilizadas gratuitamente e com significativos avanços em relação às imagens do legado Landsat – resolução temporal de 5 dias, contra os 16 dias do Landsat-8-OLI; e quatro bandas com resolução espacial de 10 m, contra os 30 m multiespectrais do sensor OLI.

Assim, este estudo visa avaliar diferentes técnicas de processamento digital aplicadas às imagens Sentinel-2 de forma a detectar/identificar a infraestrutura de exploração madeireira mecanizada (estradas e pátios) para, conseqüentemente, revelar áreas em processo de corte seletivo ilegal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa envolveu o uso de quatro técnicas de processamento digital em imagens Sentinel-2 para avaliar desempenho dessas técnicas e do produto Sentinel-2 na capacidade de detecção da infraestrutura de exploração madeireira (estradas e pátios) do manejo florestal que ocorre na área de estudo – as etapas do processamento são demonstradas na Figura 01 e estão detalhadas nos subtópicos da metodologia.

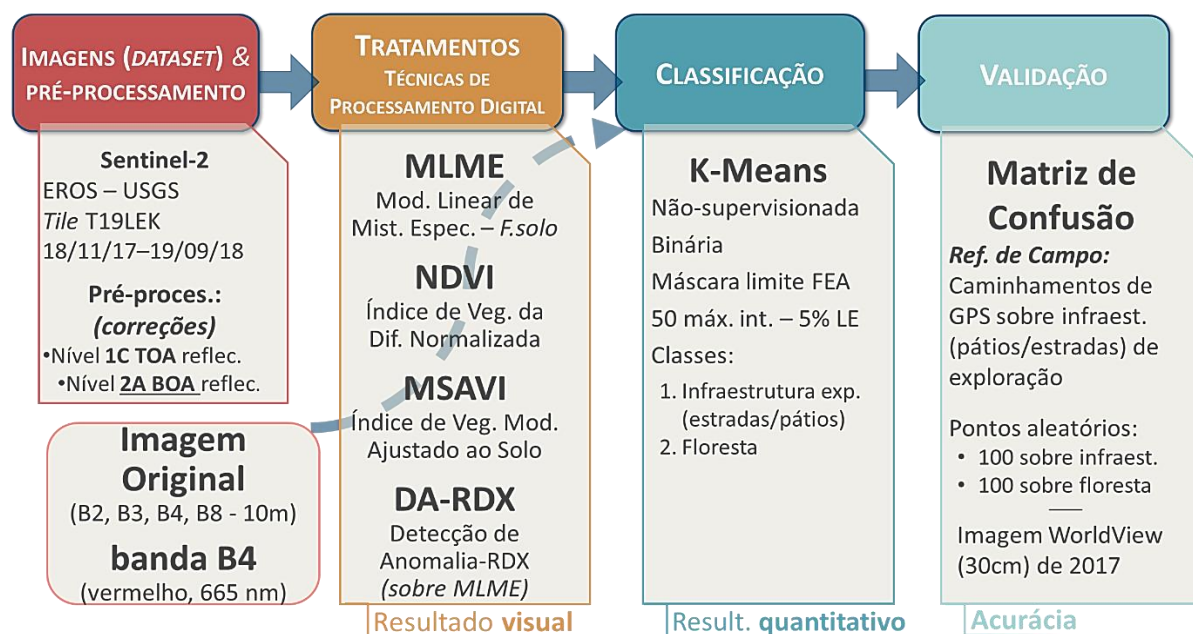


Figura 1. Diagrama de fluxo das etapas de processamento envolvidas na pesquisa. Fonte: diagrama elaborado pelo autor.

2.1. Área de Estudo

A área de estudo insere-se na Floresta Estadual do Antimary (FEA), Unidade de Conservação de Uso Sustentável criada em 1997 pelo Decreto nº 046 e objetiva o uso múltiplo sustentável dos recursos naturais e a pesquisa científica (ACRE, 1997; 2005; BRASIL, 2000).

A abordagem recai, especificamente, sobre a exploração de três Unidades de Produção Anual (UPA) da FEA – UPA 04, UPA 03-R e UPA 05 –, bem como sobre sua Reserva Absoluta (RA), utilizada como área teste por consistir em região florestal com destinação única de preservação, comportando-se como uma espécie de “padrão” de área onde não deve haver detecção de estradas/pátios. As explorações ocorreram através de concessão florestal, sob Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), em incursões anuais mediante pré-propositura de Plano de Operação Anual (POA) e a obtenção da respectiva Autorização de Exploração (AUTEX); o corte das árvores nas UPAs foi executado de forma semi-mecanizada (com motosserra) e o arraste dos indivíduos mecanizado com veículo tipo *Skidder*.

O estudo se restringiu a três UPAs da FEA, com base na exploração madeireira ocorrida em 2017 e 2018: (1) UPA 03-R, a qual corresponde à subdivisão ao norte da UPA 03, teve exploração ocorrida entre agosto e setembro de 2017; (2) UPA 04, a qual fora dividida em duas seções e explorada em dois momentos diferentes – sua porção centro-oeste fora explorada em 2016, e a porção leste fora explorada em 2017, juntamente com a UPA 03-R; (3) e UPA 05, explorada em 2018. Dados subsidiários sobre as UPAs constam no Apêndice A.

A Figura 2 contextualiza espacialmente as áreas abordadas no estudo (UPAs em questão e RA) em meio ao zoneamento da FEA e traz, subsidiariamente, a macrolocalização da área nos limites políticos do território brasileiro.

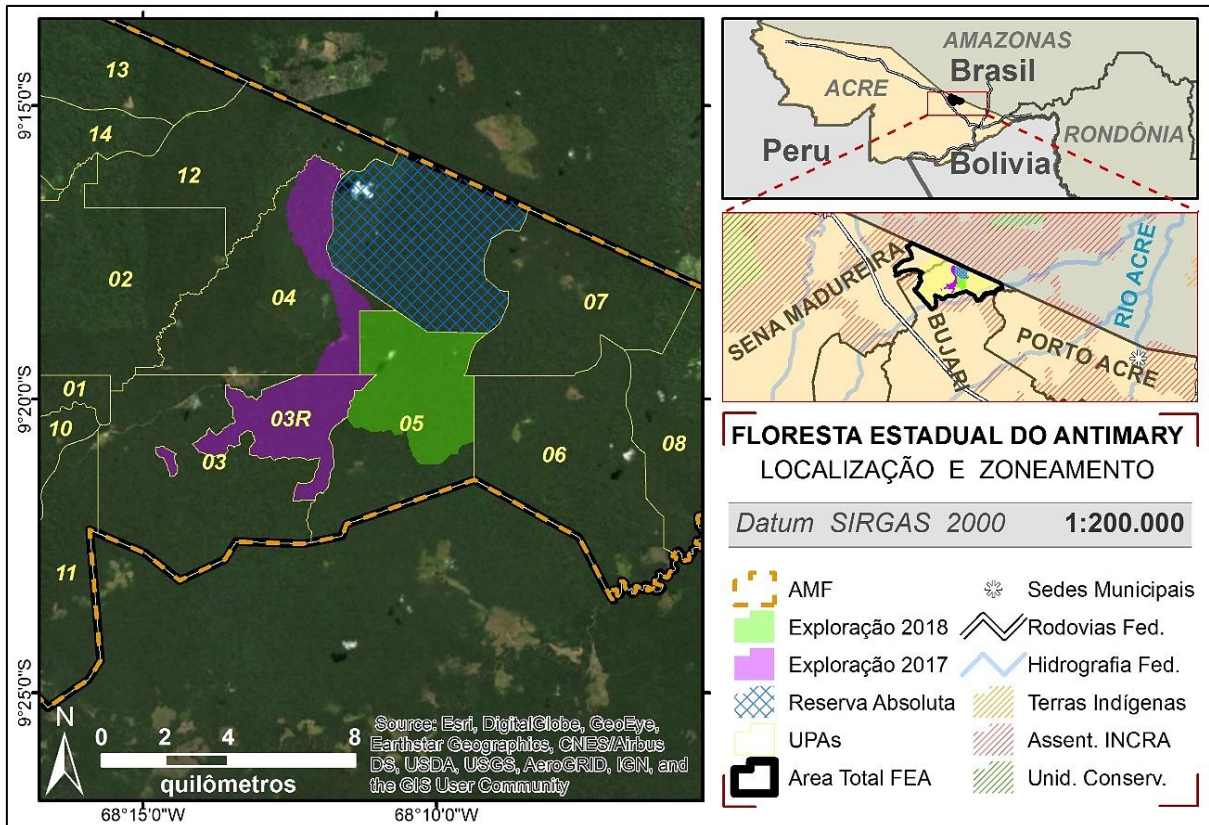


Figura 2. Área de estudo disposta sobre o zoneamento da Floresta Estadual do Antimary (FEA) e sua localização no território brasileiro. Em lilás, a exploração ocorrida em 2017 (parte da UPA 04 e UPA 03-R); em verde, a exploração de 2018 (parte da UPA 05); o hachurado em azul demonstra a RA.

Fonte da imagem: *Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community.*

A vegetação da FEA se classifica como Floresta Amazônica (Bioma Amazônico) – apresenta Floresta Aberta com Bambu associada com Floresta Densa (FAB + FD) e Floresta Densa associada com Floresta Aberta com Palmeiras (FD + FAP) como tipologias predominantes (respectivamente, cerca de 38% e 32% da área). Os solos predominantes são classificados como Argissolo Vermelho Distrófico Latossólico e Latossolo Amarelo Distrófico Argissólico (ACRE, 2006; 2012).

A área está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Purus. Na categorização climática, enquadra-se no subclima Tropical de Monções – Am (sistema de Köppen-Geiger), com clima quente e úmido, temperatura média anual de 25°C e duas estações definidas: uma seca e outra chuvosa, com período chuvoso compreendendo os meses de outubro a abril. Está inserida na unidade geomorfológica Depressão do Rio Branco, possuindo um padrão de drenagem angular e tendo o relevo, de forma geral, como suave ondulado a ondulado (ACRE, 2006; 2012).

2.2. Imagens (*dataset*) e Pré-processamento

Foram utilizadas imagens da constelação Sentinel-2, missão composta por dois satélites óticos do programa espacial *Copernicus* da Agência Espacial Europeia (ESA – *European Space Agency*) (ESA, 2000-2019). As imagens foram obtidas do centro EROS (*Earth Resources Observation and Science*) do serviço geológico norte americano – USGS (*U.S. Geological Survey*). São disponibilizadas com pré-processamento nível “1C”: correção geométrica (ortorretificação e registro espacial ao nível de subpixel) e correção radiométrica/atmosférica ao nível de reflectância ao Topo da Atmosfera (TOA, *Top-Of-*

Atmosphere reflectance) (USGS EROS, 2017; ESA, 2015). No Apêndice B consta tabela com as principais características da missão Sentinel-2 e das demais missões similares.

Para as análises, buscaram-se imagens da cena (*tile*) T19LEK – quadrante em que se insere integralmente a FEA – dos meses finais do ano da respectiva exploração, desde que não tivessem as áreas das UPAs recobertas por nuvens. Assim, as imagens utilizadas, as quais correspondem as encontradas com melhor condição de visibilidade para os experimentos, consistem nas imagens: (a) Sentinel-2A, de 18/11/2017; (b) Sentinel-2B, de 19/09/2018. O sensor embarcado nestes satélites é o MSI – *Multi-Spectral Instrument*.

No experimento, foram utilizadas as bandas com 10 m de resolução espacial – banda B2 (comprimento de onda central de 490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) e B8 (842 nm) (ESA, 2015). Essas faixas espectrais foram escolhidas por possuírem a melhor resolução espacial, sendo assim, mais propícias a melhor detectar a infraestrutura de exploração em meio ao dossel florestal e correspondem as faixas espectrais de maior interesse no mapeamento da vegetação: o visível (vermelho, verde e azul) e o infravermelho próximo (PONZONI et al., 2012).

O nível de pré-processamento foi aprimorado ao nível “2A” através do aplicativo SNAP (*Sentinel Application Platform*, versão 6.0.5, fornecido pela ESA) pela ferramenta *SEN2COR Processor*. O referido procedimento ajusta a imagem ao nível de reflectância à Base da Atmosfera (BOA, *Bottom-Of-Atmosphere reflectance*); além de correções atmosféricas para nuvens cirrus (ESA, 2015). Assim, o nível de pré-processamento desejado para aplicação de processamentos digitais foi obtido (NOVO, 2010).

Os dados vetoriais da Floresta Estadual do Antimary pertinentes foram obtidos junto a Secretaria de Estado e do Meio Ambiente do Acre (SEMA), bem como dados vetoriais referentes à exploração e regulação do Plano de Manejo Florestal que na FEA se desenvolve.

2.3. Tratamentos: Técnicas de Processamento Digital

Buscando-se a melhor capacidade de detecção da infraestrutura de exploração florestal da área de estudo, foram testadas quatro técnicas de processamento digital nas imagens Sentinel-2 (itens I a IV), bem como duas abordagens sem processamento, para fins de comparação (itens A e B):

- I. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME);
- II. Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI);
- III. Índice de Vegetação Modificado Ajustado ao Solo (MSAVI);
- IV. Detecção de Anomalia-RDX (DA-RDX);
 - A. Imagem original (composta pelas quatro bandas de dez metros);
 - B. Imagem da banda 4 singularmente (vermelho, 665 nm).

2.3.1. Análise de Mistura Espectral

O Modelo de Mistura Espectral está entre uma das técnicas de processamento digital mais utilizadas para detectar o corte seletivo e/ou degradação no dossel florestal. Essa metodologia foi empregada, ao menos em alguma etapa, na pesquisa de diversos autores que buscaram melhorar a detecção de distúrbios florestais em florestas tropicais (SOUZA et al., 2005, 2013; ASNER et al., 2005, 2009; SHIMABUKURO et al., 2014, 2019; MATRICARDI et al., 2007, 2010, 2013; PINAGÉ; MATRICARDI, 2015).

Para a detecção da infraestrutura de exploração florestal por meio deste tratamento, fora isolada e utilizada somente a imagem-fração respectiva ao componente solo, pois esse membro final melhor destaca as cicatrizes da exploração madeireira (corte seletivo), segundo Souza et al. (2013) e Matricardi et al. (2013).

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) é expresso matematicamente da seguinte forma (SHIMABUKURO; PONZONI, 2017):

$$R_m = a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mn} x_n + e_m$$

ou,

$$R_i = \sum (a_{ij} x_j) + e_i$$

em que:

- R_i = refletância espectral média para a i -ésima banda espectral;
- a_{ij} = refletância espectral do j -ésimo componente no pixel para a i -ésima banda espectral;
- x_j = valor de proporção do j -ésimo componente no pixel;
- e_i = erro para a i -ésima banda espectral;
- $e_j = 1, 2, \dots, n$ (n = número de componentes assumidos para o problema);
- $e_i = 1, 2, \dots, m$ (m = número de bandas espectrais para o sistema sensor).

O modelo fora calibrado – através da interpretação visual de Regiões de Interesse (ROI) compostas por áreas de *pixels* puros – para extrair três membros-finais (ou “imagens-fração”) da imagem Sentinel-2: Vegetação, Solo e Sombra. Foram buscadas e demarcadas ROIs no interior e no entorno da FEA, sendo que suas características também foram observadas, para confirmação, em imagens de alta resolução de data equivalente. As bandas utilizadas da imagem fonte consistem nas bandas quatro bandas de dez metros (B2, B3, B4 e B8) corrigidas ao nível 2A. Não foi utilizado o membro final correspondente à Vegetação Fotossinteticamente Não Ativa (NPV, do inglês), pois a resposta espectral desse alvo se aproxima da resposta espectral do solo, podendo gerar confusão no algoritmo (SHIMABUKURO et al., 2019). O modelo fora calibrado e processado com o programa ENVI (Versão 5.0.3).

2.3.2. Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

Como uma das primeiras e mais utilizadas ferramentas para o monitoramento da vegetação, o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) é utilizado para construir perfis sazonais e temporais das condições da vegetação (PONZONI et al., 2012). Proposto por Rouse et al. (1973), o índice composto pela razão normalizada entre as bandas do vermelho (radiação majoritariamente absorvida pela fotossíntese) e do infravermelho (majoritariamente refletida) tem sido explorado em diversos estudos para diferentes focos, como abordagens climática, agrícola e florestal, apresentando relativo sucesso na avaliação de vegetação. Expressa-se da seguinte forma:

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_v}{\rho_{IVP} + \rho_v}$$

onde:

- ρ_{IVP} = refletância na faixa espectral do infravermelho próximo;
- ρ_v = refletância na faixa espectral do vermelho

Nas imagens dos satélites da constelação Sentinel-2, a banda referente ao vermelho é a banda 4 (comprimento de onda central de 665 nm), e a banda correspondente ao infravermelho próximo é a banda 8 (842 nm); ambas possuem 10 m de resolução espacial. O procedimento fora realizado por meio do programa SNAP.

2.3.3. Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado (MSAVI)

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado (MSAVI), descrito por Qi et al. (1994), assim como no NDVI, é calculado por razão entre os valores da banda do vermelho e do infravermelho próximo. Todavia, o NDVI é mais sensível aos efeitos de brilho e de cor do solo, da atmosfera, da cobertura de nuvens e de sombras das copas/nuvens, o que poderia dificultar as análises por aumentar o nível de ruídos (XUE; SU, 2017). Assim, foi proposto o MSAVI como alternativa que contornaria tais interferências, melhorando a sensibilidade aos fundos de solo na imagem.

A inovação do MSAVI é que em seu cálculo é adicionado um fator de correção, representado pela variável L , que ajusta o índice de acordo com a quantidade global de vegetação que há nos dados fonte. O índice originou-se de modificação do Índice de Vegetação Ajustado para Solo (SAVI), e tanto um quanto outro visam a redução de ruídos para com a representação da relação entre solo e vegetação nos resultados dos índices (OLIVEIRA et al., 2007). Contudo, a diferença entre esses índices é que no SAVI o valor de L é definido arbitrariamente pelo operador de acordo com a densidade vegetacional na cena (variando de 0 a 1 – quanto mais próximo de 0, mais semelhante ao NDVI será o SAVI); e no MSAVI o valor de L é determinado automaticamente de acordo com a fórmula descrita abaixo (XUE e SU, 2017). O procedimento fora realizado por meio do programa SNAP. Calcula-se da seguinte forma (Qi et al., 1994):

$$MSAVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_v}{\rho_{IVP} + \rho_v + L} * (1 + L)$$

onde L é variável definida pela seguinte equação:

$$L = 1 - 2a * NDVI * (\rho_{IVP} - a * \rho_v)$$

em que:

- a = declividade reta da reta do solo.
- ρ_{IVP} = refletância na faixa espectral do infravermelho próximo;
- ρ_v = refletância na faixa espectral do vermelho

2.3.4. Detecção de Anomalia (DA)

O algoritmo de Detecção de Anomalia (DA) utilizado foi o RXD – *Reed-Xiaoli Detector*, proposto por I. S. Reed e X. Yu (1990).

Esse tipo algoritmo destaca as características que se sobressaem do normal e/ou do esperado – as ditas “anomalias”. A formulação proposta fora ambientada em imagens Landsat e origina-se de adaptação do algoritmo de detecção CFAR (*Constant False Alarm Rate*) através da adequação por probabilidade de densidade baseada em razão de verossimilhança generalizada (*GRL – Generalized Likelihood Ratio*) – em suma, o algoritmo em questão analisa a diferença espectral dos *pixels* de determinada região e de seus vizinhos em busca das anomalias (REED e YU, 1990).

A técnica busca fuga dos padrões espectrais do contexto, aplicável em imagens multiespectrais e hiperespectrais (LI e DU, 2015). No estudo em tela, o dossel corresponde a esse contexto (informação de fundo) no qual se buscam as anomalias (como, por exemplo, uma estrada em meio ao dossel). Calcula-se da seguinte forma:

$$\delta_{RDX}(r) = (r - \mu)^T K_{LxL}^{-1} (r - \mu)$$

em que:

r = vetor da amostra
 μ = média da amostra
 K_{LxL} = matriz de covariância da amostra

Tal algoritmo fora aplicado sobre o resultado do MLME com o programa ENVI², processando-se, simultaneamente, duas imagens-fração obtidas da análise de mistura – fração vegetação e fração solo, por apresentarem-se contrastantes entre si; a fração sombra não fora utilizada pois apresentava-se apenas como ruído. Ante ao processamento, utilizou-se como máscara o vetor dos limites da Floresta Estadual do Antimary – ou seja, somente o interior da FEA fora processado pelo algoritmo de DA-RDX.

2.4. Classificação

Para analisar a sensibilidade dos tratamentos, utilizou-se o processo de classificação não-supervisionado K-Means (TOU; GONZALEZ, 1974; SILVA, 2007; SILVA, 2009). Foi escolhido um método de classificação não-supervisionado para evitar o viés interpretativo do operador. Buscou-se a identificação dos pátios e estradas de exploração porque são feições caracterizadas por exposição de solo, as quais são comumente observadas no corte seletivo (SOUZA; BARRETO, 2000; MATRICARDI et al., 2013) em forma dendrítica (ARIMA et al., 2016), e analisa-se a capacidade das imagens Sentinel-2 em detectar tais feições através dos tratamentos.

O limite total da Floresta Estadual do Antimary fora utilizado como recorte (máscara) nas classificações de todos os tratamentos, de forma a fornecer, ao classificador, um ambiente razoavelmente homogêneo – meio ambiente florestal tropical – mas, que apresentasse, ainda, exemplos de típicas paisagens que compõe o mosaico que é o ambiente natural Acreano: diferentes fisionomias florestais, manchas florestais em diferentes estágios sucessionais, áreas com pastagens, área de solo exposto etc. Por esse motivo não fora utilizado o recorte somente da(s) UPA(s) explorada(s).

No ambiente ENVI, o classificador foi configurado em duas classes para um mapeamento binário, onde uma classe indicaria a estrutura de exploração florestal (“1”, sim, ou positivo) e a outra classe identificaria a cobertura florestal (“0”, não, ou negativo, para estradas de exploração), em suas diversas formas, agregadamente. Utilizou-se um máximo de 50 interações e limite de mudanças de 5%. Geometricamente, as imagens classificadas apresentam-se com registro coincidente com a imagem Sentinel-2 original (células de 10 m com mesmo *grid*).

2.5. Validação

Para aferição da acurácia, foram lançados duzentos pontos aleatórios sobre o resultado da classificação (dados preditivos) para comparação com a referência de campo (dados reais) através do método da Matriz de Confusão (ou Matriz de Erro) (CONGALTON, 1991). Os dados reais (referência de campo) consistem em caminhamentos sobre as estradas e pátios das UPAs em análise; toda estrada construída na área de exploração fora mapeada com no mínimo duas passagens sobre cada trecho.

² Como base para comparação e observação, o algoritmo DA-RDX fora aplicado, também, sobre as quatro bandas de 10 m da imagem Sentinel-2 utilizadas como fonte para o MLME

Assim, para cada ano, foram lançados 100 pontos aleatórios sobre as estradas, com distanciamento mínimo de dez *pixels* entre eles (cem metros); e 100 pontos aleatórios sobre a área florestal que não abrigaria estradas/pátios, com distância mínima de dois *pixels* (vinte metros) entre o curso central da estrada mapeada, para evitar alocação de pontos nos *pixels* de influência imediata das estradas.

Os dados foram obtidos por aparelho GPS (*Global Positioning System*) no momento da fiscalização executado pelo órgão ambiental³. Para confirmar a precisão do caminhamento de GPS sobre as estradas, utilizou-se a imagem ortorretificada de alta resolução espacial *WorldView 03* (30 cm), disponível para a UPA 04 em momento após a exploração de 2017.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tratamentos foram avaliados quanto à sensibilidade na detecção/identificação da infraestrutura de exploração florestal madeireira (estradas e pátios), a qual se organiza de forma dendrítica (ARIMA et al., 2016). Assim sendo, o foco do estudo foi a capacidade de melhor distinguir as estradas/pátios nas áreas de exploração de impacto reduzido, e não sobre quantificar a área florestal atingida; pois, de toda forma, a partir da identificação das estradas de exploração, quantificar a área afetada seria possível, nas formas descritas na literatura (MATRICARDI et al., 2007; ASNER et al., 2005).

Sob a ótica da **interpretação visual**, foi possível observar, em diferentes níveis de clareza, cicatrizes da exploração florestal em todas as seis abordagens, inclusive nas abordagens sem processamento (Imagem Original e B4), o que demonstra que o Sentinel-2 apresenta capacidade para detectar o corte seletivo de baixo impacto em floresta tropical, como a exploração que ocorre na área de estudo. Contudo, de fato a identificação dos limites e continuidade das estradas foi favorecida pelas imagens provenientes dos tratamentos, pelos quais ficou favorecida a visualização da disposição dendrítica da infraestrutura de exploração. No Apêndice C consta figura que ilustra as imagens das abordagens em questão.

O método considerado mais adequado para a rápida detecção e observação visual foi o DA, pois apresenta pouco ruído de fundo e, ainda, omite parte dos distúrbios diversos do dossel e das áreas de pastagens/desmatadas, deixando, na imagem, as estradas de exploração mais nítidas quanto ao fundo.

A abordagem mais dificultosa para a visualização foi a Imagem Original (em composição RGB ou falsa-cor), na qual a infraestrutura de exploração menos se destacou. Dentre os processamentos digitais, o MSAVI apresentou o pior resultado em relação à facilidade da interpretação visual por conter muito ruído de fundo na imagem, divergentemente ao constatado por Matricardi et al. (2010).

Visualmente, os tratamentos NDVI e MLME, assim como a abordagem B4, apresentaram similar e razoável resultado quanto ao favorecimento de visualização do alvo para interpretação visual: apresentaram uma melhor visualização da continuidade das estradas em relação ao DA, porém, destacam menos as estradas principais em relação ao fundo da imagem.

Para realizar análises **quantitativas**, as imagens foram classificadas e submetidas ao processo de validação, conforme descrito na metodologia. O objetivo principal não foi a acurácia geral do mapeamento em si, e sim a sensibilidade adequada para a detecção da infraestrutura de exploração. Embora a Acurácia Geral e Coeficiente Kappa sejam parâmetros importantes na descrição da acurácia de mapeamentos, não informam a distribuição do erro entre as classes; assim, o foco foi direcionado aos parâmetros da classe de interesse – classe denominada “Estrada”, que corresponde à infraestrutura de exploração (estradas de extração e pátios).

³ Os dados foram coletados (e fornecidos à pesquisa) por servidores públicos da Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Acre. Endereço do órgão: Rua Benjamin Constant, 856 – Centro. CEP 69.900-160. Rio Branco/AC.

De forma genérica, para se mapear, além do desflorestamento completo, a degradação florestal, o método precisa ser sensível o bastante para se detectarem mudanças sutis, mas não sensível demais a ponto de classificar como degradação as variações ecológicas normais de um dossel florestal (como arquitetura e composição de espécies); ainda, em se tratando de florestas tropicais, o método precisa ser amplo o bastante para acomodar as dinâmicas condições atmosféricas presentes nos trópicos (ASNER et al., 2009).

Quantitativamente, os resultados estão sintetizados na Figura 03, a qual traz Acurácia do Usuário (A.U.) para as duas classes (denominadas “Estrada” e “Floresta”), bem como Acurácia Geral e Coeficiente Kappa. Foi apresentada a Acurácia do Usuário porque é o parâmetro que informa o quão frequente a classe determinada no mapa realmente se apresenta no solo, sendo assim, parâmetro fundamental para a identificação inequívoca das estradas com o objetivo de atuação governamental no controle e fiscalização ambiental. A Figura 04 traz os Erros de Comissão e os Erros de Omissão para a classe de interesse. Os resultados das Matrizes de Confusão, para todos seus parâmetros, constam no Apêndice C.

O tratamento considerado de mais sucesso fora o MLME, seguido do NDVI, ambos com 98% de Acurácia do Usuário para a classe Estradas e, respectivamente, 78% e 75% de Acurácia Geral (Kappa considerado razoável, 0,57 para aquele, e 0,50 para este). Esse resultado dialoga com o encontrado em Pinagé e Matricardi (2015).

A pior abordagem fora a utilização da Imagem Original sem processamento e o tratamento MSAVI. Embora o MSAVI tenha apresentado, dentre as abordagens, a maior Acurácia Geral (82%) e o maior Coeficiente Kappa (0,65), para o objetivo proposto – detecção de estradas de exploração –, fora considerado como o tratamento de pior desempenho porque apresentou o mais alto Erro de Comissão para a classe Estradas (21%) dentre as técnicas de processamento digital, seguido da Imagem Original (39%).

O MSAVI apresentou elevada sensibilidade para a classe Estrada, o que retornou um resultado em que essa classe fora superestimada (alto Erro de Comissão), dificultando a identificação inequívoca da disposição dendrítica da infraestrutura de exploração. De fato o MSAVI, juntamente com a Imagem Original, apresentaram a menor omissão das estradas, porém, com isso se elevou por demasiado a comissão, atribuindo como Estrada também pontos onde só haveria Floresta, o que gerou confusão entre as classes – as Figuras 05 e 06 ilustram tal cenário, onde se observa, nos quadros MSAVI, a classificação de *pixels* como Estrada dentro da Reserva Absoluta devido à alta sensibilidade, gerando confusão com as respostas do dossel.

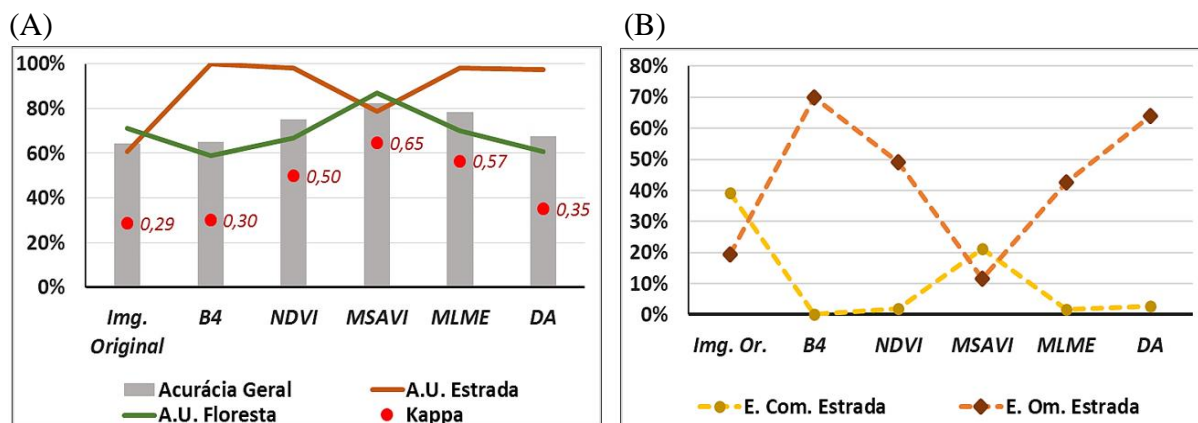


Figura 3. (A) Acurácia Geral, Coeficiente Kappa e Acurácia do Usuário p/ classes Estrada e Floresta; (B) Gráfico com Erro de Comissão e Omissão para a classe de Estrada.

A abordagem B4, embora tenha apresentado 100% de Acurácia do Usuário para a classe Estrada, não se demonstrou favorável para o objetivo porque omitiu por demais essa classe e, com isso, apresentou alto Erro de Comissão para a classe oposta; ou seja, omitiu muito a classe Estrada e cometeu a classe Floresta, apresentando comportamento oposto ao MSAVI.

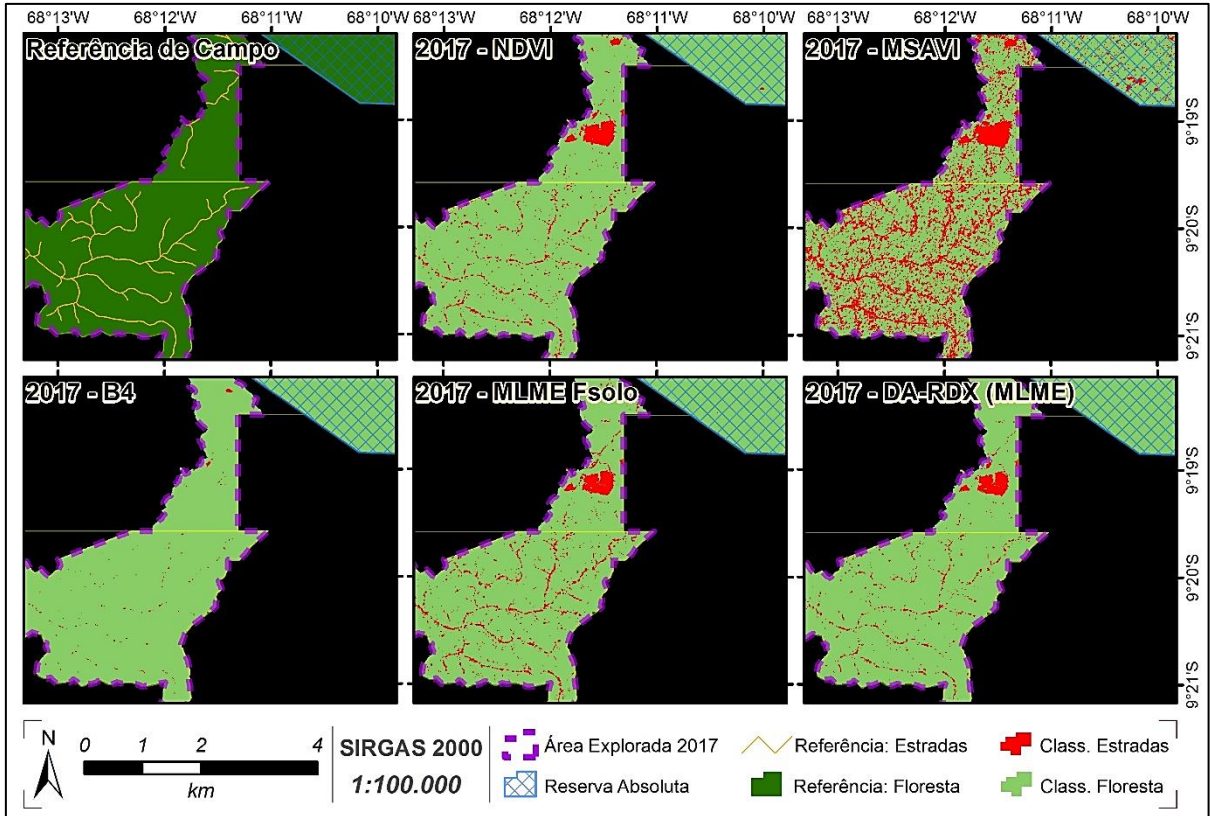


Figura 4. Resultado do processo binário de classificação sobre os tratamentos aplicados na área de exploração de 2017 e Reserva Absoluta.

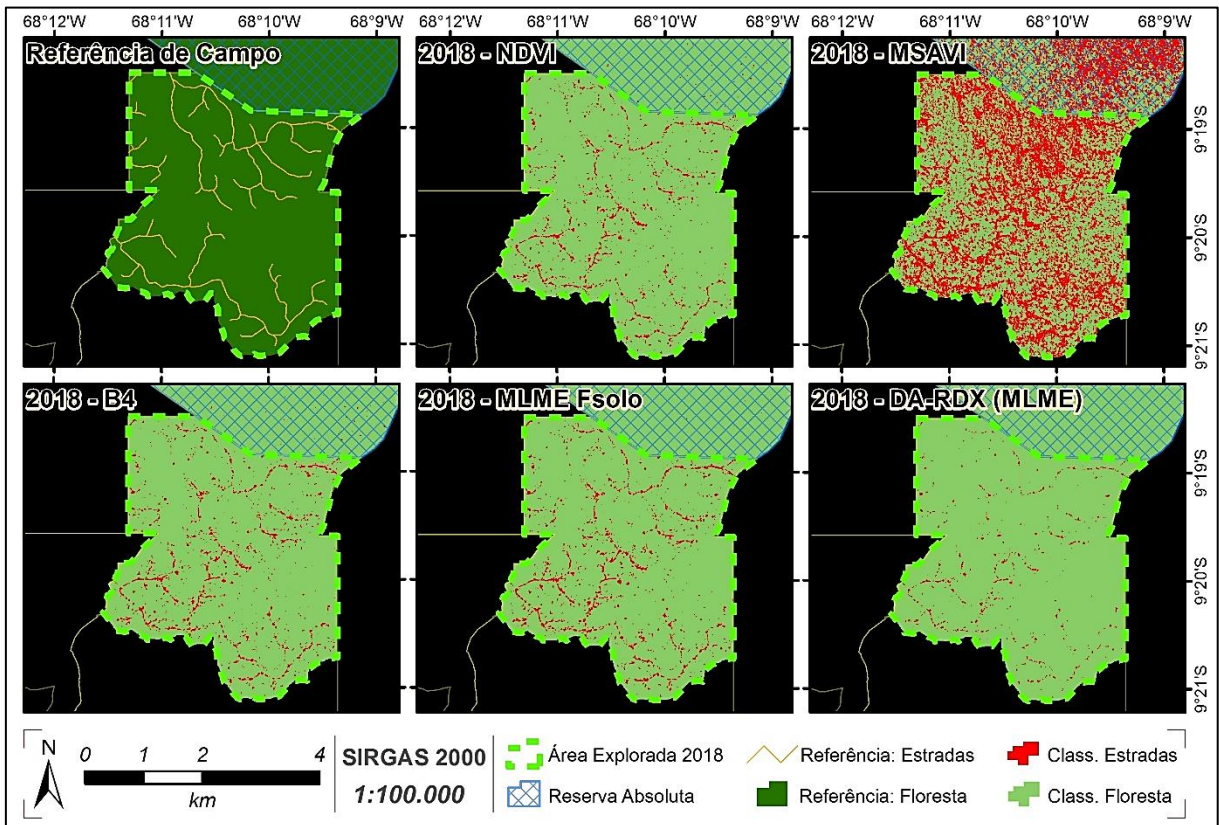


Figura 5. Resultado do processo binário de classificação sobre os tratamentos aplicados na área de exploração de 2018 e Reserva Absoluta.

Os tratamentos NDVI e DA apresentaram boa resposta nos parâmetros, com o detalhe que o DA apresentou, em relação ao NDVI e ao MLME, mais omissão em relação a classe Estrada. Contudo, o MLME foi considerado, segundo a análise quantitativa, a melhor abordagem por apresentar boa relação entre Erros de Comissão e Omissão para Estradas.

Embora a (DA) Detecção de Anomalia RXD tenha se mostrado eficiente na detecção das estradas de exploração para a interpretação visual, não respondeu muito bem ao processo de classificação e, assim, obteve resultado mediano nos parâmetros quantitativos. A técnica utilizada (RXD global) acusa as anomalias de acordo com a densidade da variância dos dados no dossel fragmentado pelas estradas de exploração, destacando as feições do contexto da cena. Contudo, Delian Liu et al. (2008) propuseram uma variação no algoritmo de Detecção de Anomalia que poder-se-ia demonstrar mais interessante para a detecção do corte seletivo, pois ampararia a detecção das anomalias em segmentações texturais (TBAD – *Texture Segmentation Based Anomaly Detection Algorithm*) e não na verossimilhança generalizada, como o faz a variação RDX. Dessa forma, recomendam-se estudos futuros para testar tal hipótese e melhor desenvolver a detecção de mudanças sutis na vegetação florestal com técnicas de *neural learning*.

Importante observar que o processo de classificação e/ou validação não considera a linearidade e continuidade intrínseca às estradas, ou seja, para que haja erro ou acerto basta que haja divergência ou coincidência entre o *pixel* classificado e a referência de campo, independentemente da forma e contexto que se organizam as feições classificadas. A capacidade de contextualização do interpretador ultrapassa os limites lógicos do processo de classificação não supervisionada e respectiva validação. Dessa forma, para a identificação do traçado das estradas sem erros, é mais recomendado um tratamento que cometa mais Erros de Omissão para a classe Estradas que Erros de Comissão; pois a percepção humana consegue preencher as lacunas de omissão, divergentemente da imagem com muita comissão, que acaba por confundir o interpretador humano.

Contudo, quando a omissão é excessiva a observação, obviamente, fica prejudicada. Por isso é comum casos em que estudos e iniciativas que abordem a problemática do monitoramento florestal negligenciem os demais distúrbios e impactos ambientais nos quais a cobertura vegetal não é totalmente convertida como o é no desmatamento a corte raso (NEPSTAD et al., 1999), e a maioria das metodologias comuns são insuficientes para a detecção do corte seletivo em larga escala, sendo necessário, para isso, processamentos mais sofisticados (ASNER et al., 2005). Isso foi também constatado no presente estudo, pois o uso da Imagem Original (quatro bandas, RGB e NIR) e da banda vermelha singularmente (B4) não apresentaram bom desempenho no experimento: aquela gerou confusão entre as classes; esta subestimou e omitiu muito na classe Estradas.

Essa dificuldade em se monitorar o corte seletivo se dá porque as áreas florestais degradadas apresentam-se como um complexo mosaico composto por ilhas florestais que não sofreram distúrbios; fragmentos onde as árvores foram completamente derrubadas, como estradas e pátios de estocagem/romaneio; e regiões onde ainda há floresta, porém, com o dossel degradado, com clareiras abertas e alterações estruturais, devido às atividades madeireiras e/ou outros impactos – esse complexo mosaico dificulta a perfeita caracterização via sensoriamento, que naturalmente já é dificultada pela dinâmica de regeneração natural, típica de florestas tropicais (SOUZA et al., 2005). Ainda, conceitualmente, quanto mais grosseira for a resolução espacial do sensor, mais desafiador torna-se esse tipo de mapeamento porque aumenta-se a mistura nos *pixels*.

Em estudo sobre essa dialética – resolução espacial do sensor *versus* capacidade de detecção de distúrbios florestais –, Pinagé e Matricardi (2015) analisaram a capacidade de alguns algoritmos em se detectar a exploração madeireira em regime de Manejo Florestal

variando-se a resolução espacial do sensor e concluíram, como é de se esperar, que há ganhos significativos na capacidade de detecção ao se refinar a resolução de 30 m para 10 m. Porém, curiosamente observaram que tal tendência não se repete ao se refinar a resolução de 10 m para 5 m, ou seja, a resolução de 10 m seria adequada, a nível de escala regional, ao mapeamento da estrutura do dossel florestal. Isso corrobora com o pressuposto de que o satélite Sentinel-2 traz avanços para se acessar o corte seletivo em relação ao Landsat (Shimabukuro et al., 2019).

Em relação à **temporalidade** da observação, ou seja, capacidade de observar as estradas de exploração com o passar do tempo, foi constatado, em todas as seis abordagens, que com apenas um ano de intervalo a infraestrutura de exploração fica praticamente invisível na imagem do ano subsequente, com exceção das estradas principais e/ou que seguiram sendo utilizadas; todas as estradas secundárias desapareceram em um ano, bem como as clareiras e pátios abandonados. Tal constatação pode ser visualizada no Apêndice D.

Isso se dá, provavelmente, (a) devido ao fato de a regeneração natural no estado do Acre (como em Rondônia e Amazonas) ser mais intensa quando comparada a alguns outros estados amazônicos (MATRICARDI et al., 2007), o que dificultaria a observação da estrutura de exploração quando há lapso temporal superior a um ano; (b) também, por ser um maciço florestal protegido e controlado, como unidade de conservação estatal formalmente demarcada e gerida, o que protegeria os ecossistemas locais de demais pressões antrópicas subsequentes; (c) trata-se de Exploração de Impacto Reduzido (EIR), executada sob Manejo Florestal Sustentável devidamente aprovado e regulado pelo órgão ambiental competente, sendo que, em comparação com a exploração convencional, a regeneração natural é mais rápida na EIR e a abertura de clareiras tende a ser diminuída pela metade (PEREIRA et al., 2002); (d) por fim, a fitofisionomia original consiste em Floresta Aberta com Bambus, possuindo os bambus rápida resposta de regeneração natural frente aos distúrbios.

Divergentemente, no estado do Mato Grosso, pesquisas demonstram ser possível detectar áreas de corte seletivo, com imagens Landsat, em áreas com exploração executada com lapso temporal de cerca de 3 anos entre a atividade e o acesso remoto (SOUZA et al., 2003; MATRICARDI et al., 2010). Todavia, ainda que a regeneração natural da floresta faça com que o dossel se feche após alguns anos, impedindo a visualização das cicatrizes da exploração por meio das imagens de satélite, a recuperação do estoque de carbono e dos processos ecológicos são atributos que demoram a se regenerar (ASNER et al., 2009).

O Apêndice E apresenta o levantamento dos principais estudos sobre detecção/mapeamento de degradação florestal com sensoriamento ótico orbital em imagens de moderada resolução espacial.

4. CONCLUSÃO

As imagens do satélite Sentinel-2 apresentaram características adequadas para detectar a exploração madeireira através da identificação de infraestrutura de exploração florestal (estradas e pátios de estocagem), considerando a exploração como mecanizada e a observação realizada no ano da exploração. A missão Sentinel-2 apresenta avanços em relação ao legado Landsat tanto em relação à resolução espacial (bandas de dez e vinte metros de resolução) quanto pela resolução temporal, a qual apresenta alto poder de revisita (cinco dias), aumentando a probabilidade de imagens sem nuvens de determinada região – o que pode ser um desafio em regiões tropicais, as quais possuem altos índices pluviométricos.

A interpretação visual da infraestrutura de exploração foi de fato facilitada através da utilização de técnicas de processamento digital. Dentre os tratamentos, o MSAVI apresentou-se como o menos favorável na identificação visual, e a DA foi o melhor tratamento para a visualização da forma das estradas, pois as destacou do fundo omitiu boa parte dos demais distúrbios como clareiras e trilhas de arraste; contudo, também ocorreu mais omissão para

estradas em si, o que não gerou prejuízo para a interpretação humana mas prejudicou o classificador não supervisionado.

Em resposta à classificação, o melhor tratamento foi o MLME, pois apresentou a melhor relação entre Erros de Omissão e Erros de Comissão. A segunda melhor abordagem fora o NDVI, seguida da DA. Ainda com foco na classe de interesse (Estrada), as abordagens B4 e MSAVI não apresentaram bom desempenho: aquela omitiu muito a infraestrutura de exploração, e esta cometeu em excesso a classe Estradas.

As análises demonstraram que a observação em pouco tempo se torna prejudicada: com apenas um ano após a exploração – ou seja, um período de chuvas e um de seca após a exploração – já não foi mais possível observar as estradas secundárias da infraestrutura de exploração, tampouco os pátios mais afastados, restando visíveis apenas as vias principais e por pouco tempo, além de, é claro, as vias que seguiram em uso. Ressalva-se que tal afirmação se aplica ao contexto edafoclimático e fitofisionômico da região que se insere a área de estudo, de forma que, conforme literatura citada, tal afirmação não estender-se-ia a toda e qualquer formação florestal amazônica ou a distante localização geográfica.

Resumindo-se, a partir dos resultados, visando acessar remotamente o fenômeno do corte seletivo através da identificação da infraestrutura de exploração florestal (estradas e pátios), pontuam-se algumas recomendações:

- Para o mapeamento automático (classificação) da infraestrutura de exploração, recomenda-se a utilização da fração solo do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME);
- Para a interpretação visual, possuindo o operador acesso a softwares comerciais, sugere-se a utilização da Detecção de Anomalia (DA) com a aplicação prévia de máscara sobre nuvens e áreas desmatadas;
- Para usuários com pouco conhecimento técnico e/ou sem acesso a softwares comerciais de processamento digital, a detecção do fenômeno do corte seletivo é possível, ainda que não tão nítido, através da utilização da banda vermelha (B4) singularmente com realces. Contudo, tal abordagem não é indicada para mapeamento computacional.

Finer et al. (2018) propuseram um protocolo de cinco passos para melhorar a eficiência institucional no combate ao desmatamento ilegal. Os passos proposto envolvem: (1) detecção de perda floresta de forma precisa e rápida; (2) priorização de dados, triando os alertas de desmatamento em diferentes níveis de importância; (3) identificação das causas do desmatamento, ajustando a resposta governamental ao tipo pressão ambiental; (4) pronta comunicação dos resultados, utilizando meios céleres; e (5) concatenação das instituições e atores envolvidos na governança ambiental para, de posse das informações produzidas, movimentarem o sistema a fim de coibi-las. Assim, a missão Sentinel-2, juntamente com outras constelações, produz informação sobre a cobertura terrestre praticamente em tempo real. O desafio passa a ser do Poder Público, que precisa organizar suas instituições de forma a utilizar efetivamente a geoinformação disponível.

A pesquisa aqui desenvolvida inserir-se-ia, principalmente, no primeiro e segundo ponto do protocolo acima descrito. A rápida e precisa detecção da infraestrutura de exploração em áreas de corte seletivo, se bem utilizada pelos órgãos de governança ambiental, pode, inclusive, impedir que a área seja completamente desmatada, pois é significativa a proporção de florestas que são totalmente abatidas e/ou queimadas após a exploração madeireira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRE (Estado). **Decreto n. 046**, de 07 de fev. de 1997. Cria a Floresta Estadual do Antimary e dá outras providências. Rio Branco, AC, 1997.

ACRE (Estado). **Decreto n. 13.321**, de 01 de dez. de 2005. Restabelece os limites da Floresta Estadual do Antimary. Rio Branco, AC, 2005.

ACRE (Estado). Governo do Estado do Acre. **Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre**. Zoneamento Ecológico-Econômico do Acre, Fase II (Escala 1:250.000): Documento Síntese. Rio Branco: SEMA, 2006. 356 p.

ACRE. Secretaria de Desenvolvimento Florestal, da Indústria, do Comércio e dos Serviços Sustentáveis (SEDENS). **Revisão do Plano de Manejo Florestal Sustentável Madeireiro da Floresta Estadual do Antimary**. Rio Branco: SEDENS, 2012.

ARIMA, E.Y.; WALKER, R.T.; PERZ, S.; SOUZA, C. **Explaining the fragmentation in the Brazilian Amazonian forest**. *Journal of Land Use Science* 11, p. 257–277, 2016.

ASNER, G.P.; BROADBENT, E.N.; OLIVEIRA, P.J.C.; KELLER, M.; KNAPP, D.E.; SILVA, J.N.M. **Condition and fate of logged forests in the Brazilian Amazon**. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103, p. 12947–12950, 2006.

ASNER, G.P.; KELLER, M.; PEREIRA, R.; ZWEEDE, J. C. **Remote sensing of selective logging in Amazonia: Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis**. *Remote Sensing of Environment* 80, p. 483–496, 2002.

ASNER, G.P.; KNAPP, D. E.; BALAJI, A; PAEZ-ACOSTA, G. **Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite 3**, 033543-3–24, 2009.

ASNER, G.P.; KNAPP, D.E.; BROADBENT, E.N.; OLIVEIRA, P.J.C.; KELLER, M.; SILVA, J.N. **Selective Logging in the Brazilian Amazon**. *Science* 310, p. 480, 2005.

BARLOW, J.; LENNOX, G.D.; FERREIRA, J.; BERENGUER, E.; LEES, A.C.; NALLY, R.M.; THOMSON, J.R.; FERRAZ, S.F. DE B.; LOUZADA, J.; OLIVEIRA, V.H.F.; PARRY, L.; RIBEIRO DE CASTRO SOLAR, R.; VIEIRA, I.C.G.; ARAGÃO, L.E.O.C.; BEGOTTI, R.A.; BRAGA, R.F.; CARDOSO, T.M.; JR, R.C. DE O.; SOUZA JR, C.M.; MOURA, N.G.; NUNES, S.S.; SIQUEIRA, J.V.; PARDINI, R.; SILVEIRA, J.M.; VAZ-DE-MELLO, F.Z.; VEIGA, R.C.S.; VENTURIERI, A.; GARDNER, T.A. **Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation**. *Nature* 535, p. 144, 2016.

BRASIL. **Lei n. 6.938**, de 31 de agosto de 1981. Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF, 1981.

BRASIL. **Lei n. 9.985**, de 18 de julho de 2000. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC. Brasília, DF, 2000.

BRASIL. **Lei n. 11.284**, de 02 de março de 2006. Gestão de florestas públicas para a produção sustentável; institui, na estrutura do Ministério do Meio Ambiente, o Serviço Florestal Brasileiro - SFB; cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal - FNDF. Brasília, DF, 2006.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n. 406**, de 02 de fevereiro de 2009. Parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável-PMFS, com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. Brasília, DF, 2009.

CHANG, Chein-I; CHIANG, Shao-Shan. **Anomaly Detection and Classification for Hyperspectral Imagery**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 6, June 2002.

COCHRANE, M.A. **Synergistic Interactions between Habitat Fragmentation and Fire in Evergreen Tropical Forests**. Conservation Biology 15, p. 1515–1521, 2001.

CONGALTON, R.G. **A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data**. Remote Sensing of Environment 37, p. 35–46, 1991.

ESA. **Sentinel -2**. European Spacial Agency. EU, 2000-2019. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>>. Acesso em: 2018.

ESA. **Sentinel -2 User Handbook**. European Spacial Agency. EU, 2015. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook>. Acesso em: 2018.

FINER, M., NOVOA, S., WEISSE, M.J., PETERSEN, R., MASCARO, J., SOUTO, T., STEARNS, F., MARTINEZ, R.G. **Combating deforestation: From satellite to intervention**. Science 360, p. 1303, 2018.

GÓMEZ, C.; WHITE, J.C.; WULDER, M.A. **Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 116, p. 55–72, 2016.

INPE. **DETER - Detecção de Desmatamento em tempo Real**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2004a. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter>>. Acesso em: 2018.

INPE. **PRODES - Amazônia**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2004b. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>>. Acesso em: 2018.

INPE. **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por Satélites**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD E QUEIMADAS 2007-2008. São José dos Campos: INPE, 2008.

INPE. **Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2014. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>>. Acesso em: outubro de 2018.

INPE. **INPE estima 7.900 km² de desmatamento por corte raso na Amazônia em 2018**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, novembro 2018. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/noticias/inpe-estima-7-900-km2-de-desmatamento-por-corte-raso-na-amazonia-em-2018>>. Acesso em: dezembro de 2018.

LAURANCE, W.; VASCONCELOS, H. **Consequências ecológicas da fragmentação florestal na Amazônia**. *Oecologia Brasiliensis* 13, 2009.

LI, Wei; DU, Qian. **Collaborative Representation for Hyperspectral Anomaly Detection**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 3, march 2015.

MATRICARDI, E.; SKOLE, D.; COCHRANE, M.; PEDLOWSKI, M.; CHOMENTOWSKI, W. **Multi-temporal assessment of selective logging in the Brazilian Amazon using Landsat data** 28, [S.l.]: [s. n.], 2007.

MATRICARDI, E.A.T.; SKOLE, D.L.; PEDLOWSKI, M.A.; CHOMENTOWSKI, W.; FERNANDES, L.C. **Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery**. *Remote Sensing of Environment* 114, p. 1117–1129, 2010.

MATRICARDI, E.A.T.; SKOLE, D.L.; PEDLOWSKI, M.A.; CHOMENTOWSKI, W. **Assessment of forest disturbances by selective logging and forest fires in the Brazilian Amazon using Landsat data**. *International Journal of Remote Sensing* 34, p. 1057–1086, 2013.

MATRICARDI, E.A.T.; SKOLE, D.; COCHRANE, M.A.; QI, J.; CHOMETOWSKI, W. **Monitoring Selective Logging in Tropical Evergreen Forests Using Landsat: Multitemporal Regional Analyses in Mato Grosso, Brazil**. *Earth Interactions* 9, p. 1–24, 2005.

NEPSTAD, D.C.; VERISSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKS, V. **Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire**. *Nature* 398, p. 505, 1999.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. Ed. São Paulo: Blucher, 2010.

NUMATA, I., COCHRANE, M.A., ROBERTS, D.A., SOARES, J.V., SOUZA, C.M., SALES, M.H. **Biomass collapse and carbon emissions from forest fragmentation in the Brazilian Amazon**. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 115, 2010.

OLIVEIRA, L. G. L.; PEREIRA, L. M.; PEREIRA, G.; MORAES, E. C.; MAEDA, E. E. **Estudo da variabilidade de índices de vegetação através de imagens do ETM+/LANDSAT 7**. Anais [...] Florianópolis: INPE, 21-26 de abril 2007.

PEREIRA, R., ZWEEDE, J., ASNER, G.P., KELLER, M. **Forest canopy damage and recovery in reduced-impact and conventional selective logging in eastern Para, Brazil**. *Forest Ecology and Management* 168, p. 77–89, 2002.

PINAGÉ, E. R.; MATRICARDI, E. A. T. **Detecção da Infraestrutura para Exploração Florestal em Rondônia Utilizando Dados de Sensoriamento Remoto**. *Floresta e Ambiente* 2015; 22(3), p. 377-390, 2015.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2 ed – atualizada e ampliada. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

PUTZ, F.E.; DYKSTRA, D.P.; HEINRICH, R. **Why Poor Logging Practices Persist in the Tropics**. *Conservation Biology* 14, p. 951–956, 2001.

- QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A **Modified Soil Adjusted Vegetation Index**. *Remote Sens. Environ.* 48, p.119-126, 1994.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: *ERTS Symposium Abstracts*, 3, 1973, Washington. Anais... Greenbelt, MD: NASA, 1973.
- REED, I. S.; YU, X. **Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution**. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 38, p. 1760–1770, 1990.
- SHIMABUKURO, Y.E.; ARAI, E.; DUARTE, V.; JORGE, A.; SANTOS, E.G.; GASPARINI, K.A.C.; DUTRA, A.C. **Monitoring deforestation and forest degradation using multi-temporal fraction images derived from Landsat sensor data in the Brazilian Amazon**. *International Journal of Remote Sensing*, p. 1–22, 2019.
- SHIMABUKURO, Y.E.; BEUCHLE, R.; GRECCHI, R.C.; ACHARD, F. **Assessment of forest degradation in Brazilian Amazon due to selective logging and fires using time series of fraction images derived from Landsat ETM+ images**. *Remote Sensing Letters* 5, p. 773–782, 2014.
- SHIMABUKURO, Y. E.; PONZONI, F. J. **Mistura Espectral: modelo linear e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- SILVA, R. V. **Avaliação de classificadores não-supervisionados, isodata e k-means, para o uso da terra na bacia do rio das ondas**. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília: [s.n.], 2009.
- SILVA, T. A. **Proposta Metodológica para Delimitação e Classificação do Ambiente de Vereda Utilizando Imagens Orbitais**. Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: [s.n.], 2007.
- SOTHE, C.; ALMEIDA, C. M.; LIESENBERG, V.; SCHIMALSKI, M. B. **Evaluating Sentinel-2 and Landsat-8 Data to Map Successional Forest Stages in a Subtropical Forest in Southern Brazil**. *Remote Sens.* 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/journal/remotesensing>>. Acesso em: novembro 2018.
- SOUZA, C.M.; ROBERTS, D.A.; COCHRANE, M.A. **Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires**. *Remote Sensing of Environment* 98, p. 329–343, 2005.
- SOUZA, C.; BARRETO, P. **An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forests in the Amazon**. *International Journal of Remote Sensing* 21, p. 173–179, 2000.
- SOUZA, J.; CARLOS, M.; SIQUEIRA, V.J.; SALES, H.M.; FONSECA, V.A.; RIBEIRO, G.J.; NUMATA, I.; COCHRANE, A.M.; BARBER, P.C.; ROBERTS, A.D.; BARLOW, J. **Ten-Year Landsat Classification of Deforestation and Forest Degradation in the Brazilian Amazon**. *Remote Sensing* 5, 2013.

SOUZA, C.; FIRESTONE, L.; SILVA, L.M.; ROBERTS, D. **Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models**. Remote Sensing of Environment 87, p. 494–506, 2003.

TOU, J. T.; GONZALEZ, R. C. **Pattern Recognition Principles**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1994, 399 p.

TYUKAVINA, A.; HANSEN, M.C.; POTAPOV, P.V.; STEHMAN, S.V.; SMITH-RODRIGUEZ, K.; OKPA, C.; AGUILAR, R. **Types and rates of forest disturbance in Brazilian Legal Amazon, 2000–2013**. Sci Adv 3, 2017.

USGS EROS. **Archive - Sentinel-2**. U.S. Geological Survey, Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, 2017. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>. Acesso em: 2018.

XIE, Y.; SHA, Z.; YU, M. **Remote sensing imagery in vegetation mapping**: a review. Journal of Plant Ecology 1, p. 9–23, 2008.

XUE, J.; SU, B. **Significant Remote Sensing Vegetation Indices**: A Review of Developments and Applications. Journal of Sensors 2017, 17, 2017.

APÊNDICE

Apêndice A – Dados sobre a exploração das UPAs em análise – UPA 04, UPA 03-R e UPA 05

Unidade de Produção Anual (UPA)	UPA 04	UPA 03-R	UPA 05
Ano da exploração	2016: porção central/oeste 2017: porção leste	2017	2018
Meses de exploração	2016: ago. – nov. 2017: jul. – set.	ago. – nov.	jul. – nov.*
Área Total (ha)	2.685 há	1.000 há	2.389 ha
Volume retirado (m³)	23.280 m ³	10.548 m ³	19.351 m ³

*como só foi possível obter imagem Sentinel-2 sem nuvem, em 2018, do final de setembro, a porção sul da UPA 05 fora excluída das análises.

Fonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Acre.

Apêndice B – Comparação da missão Sentinel-2 com importantes missões similares

Constelação (sensor)	LANDSAT 1-7 (TM / ETM+)	SPOT	RESOURCESAT (LISS-III)	SENTINEL-2 (MSI)
Tempo de vida da missão	1972 – atual	1986 - atual	2003 - atual	2015 – atual
Princípio do Instrumento	Scanner	Pushbroom	Scanner	Pushbroom
Período de Revisita (dias)	16	26	24	5*
Faixa de imagem (km)	185	2x60	141	290
Bandas espectrais	7	4	4	13
Resolução espacial (m)	30; 60	2,5; 10; 20	24	10; 20; 60

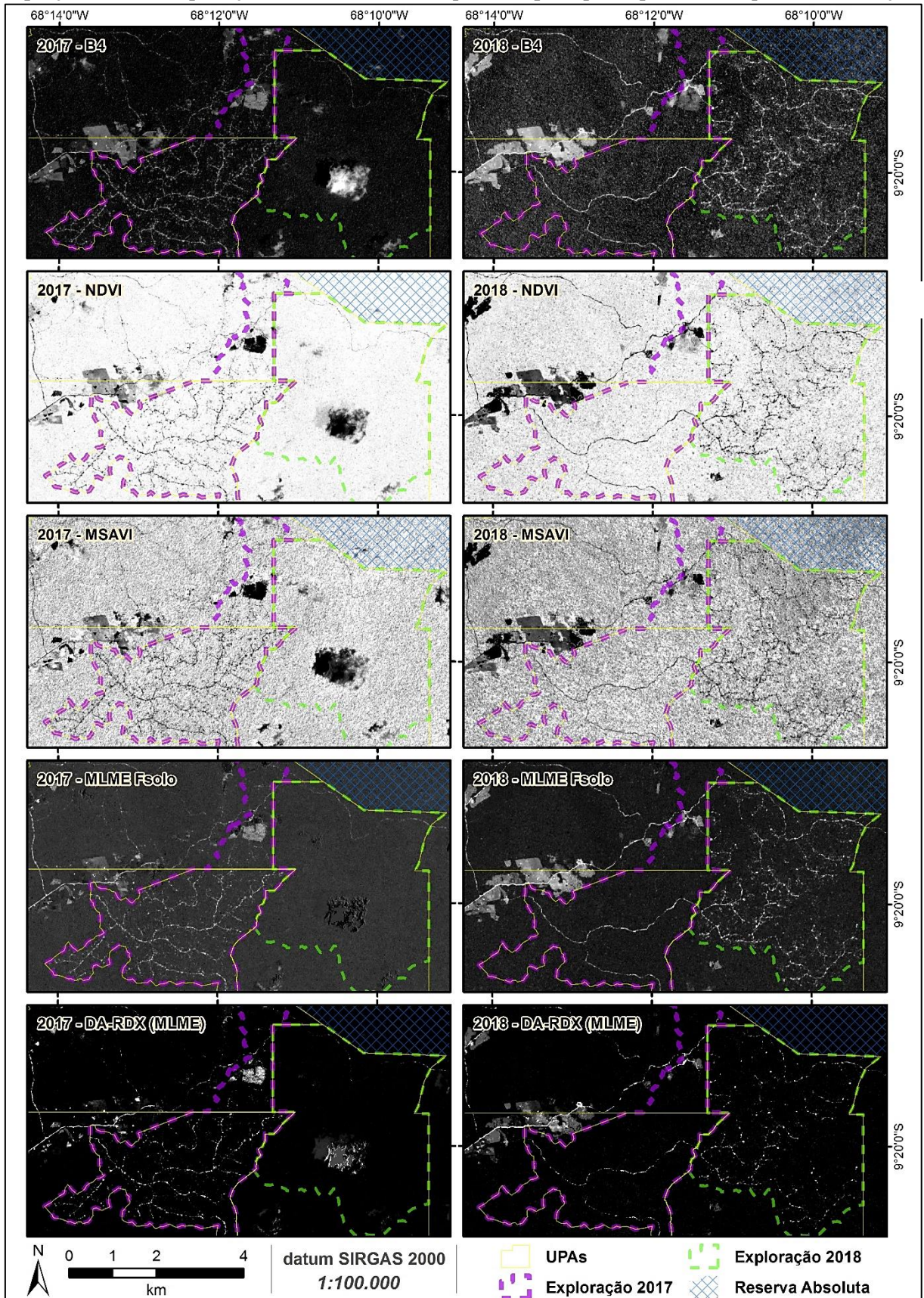
*no equador, utilizando os dois satélites da missão.

Fonte: adaptador de Sentinel-2 (ESA, 2015), pois foi adicionado Resourcesat (ISRO, 2018).

Apêndice C – Resultados quantitativos da validação: parâmetros da Matriz de Confusão

Parâmetros	Img. Or.	B4	NDVI	MSAVI	MLME	DA
Acurácia Geral	64%	65%	75%	82%	78%	68%
Coefficiente Kappa	0,29	0,30	0,50	0,65	0,57	0,35
Erro de Comissão - Estrada	39%	0%	2%	21%	2%	3%
Erro de Omissão - Estrada	20%	70%	49%	12%	43%	64%
Acurácia do Produtor - Estrada	81%	30%	51%	89%	58%	36%
Acurácia do Usuário - Estrada	61%	100%	98%	79%	98%	97%
Erro de Comissão - Floresta	29%	41%	33%	13%	30%	39%
Erro de Omissão - Floresta	52%	0%	1%	24%	1%	1%
Acurácia do Produtor - Floresta	48%	100%	99%	76%	99%	99%
Acurácia do Usuário - Floresta	71%	59%	67%	87%	70%	61%

Apêndice D – Imagens em tons de cinza dos quatro tratamentos utilizados e da simples abordagem B4. A porção norte da exploração de 2017 não fora enquadrada para que se pudesse adequar a visualização



Apêndice E – Quadro-resumo dos principais estudos sobre detecção/mapeamento de degradação florestal com sensoriamento óptico orbital

Autor/ano	Local da pesquisa Série temporal Satélite	Método utilizado na detecção e classificação	Validação e Acurácia	Prós de sistema	Contras do sistema
Shimabukuro et al. (2014)	Mato Grosso, Brasil ("Arco de Desmatamento") Jun.-out. 2002	Máscara em não-floresta (INPE); Análise de Mistura Espectral; Class. não-sup. em duas etapas FSol p/ CS, FSom p/ FG; Edição manual sob interpretação visual.	Comparação com PRODES/INPE; Matriz de confusão; 79,3%	Diferencia os tipos de degradação; corte seletivo, floresta queimada e corte raso. Relativamente simples de se aplicar.	Não é completamente automático, necessitando de diversas interações do analista. Limitações intrínsecas ao sistema Landsat.
Asner et al. (2005)	Brasil ("Arco de Desmatamento") 1999-2002	Carnegie Landsat Analysis System - lite – <i>CLASlite</i>	86-89%	Análise totalmente automatizada das perturbações florestais e fácil treinamento, mesmo para não especialistas.	Programa requer licença. Não distinção dos diferentes tipos de perturbação florestal.
Asner et al. (2009)	Pucallpa, Peru 2002	Máscaras em corpos d'água e nuvens Modelo de Mistura Espectral (AutoMUC) Class. por Árvore de Decisão (DT)	90,5%;		
Souza et al. (2005)	Landsat TM / ETM+ Mato Grosso, Brasil 1984-2004;	Análise de Mistura Espectral (SMA)	(2005) 94%	Detecta danos no dorso de florestas onde fora realizado o corte seletivo e incêndios florestais, possibilitando a distinção dos distúrbios florestais naturais e antropogênicos.	Incapacidade de identificar danos no dorso de florestas intactas.
Souza et al. (2013)	Amazônia legal, Brasil; 2000-2010	Índice de Fração da Diferença Normalizada (NDFI) Algoritmo de Classificação Contextual (CCA) (2013) IngTools	(2010) 92%		
Matricardi et al. (2007)	Landsat TM / ETM+ Amazônia legal, Brasil 1992, 1996 e 1999	DM obtido do monitoramento TRFIC Máscara em não-floresta (2007)	<i>In loco</i> (RO, PA, MT, AC) (2007)	Diferença degradação gerada por fogo daquela gera por corte seletivo. Consegue discernir diferentes níveis de degradação.	Subestima as áreas pelo espaçamento temporal; Metodologia trabalhosa e pouco automatizada.
Matricardi et al. (2013)	Landsat TM / ETM+ (600+ imagens)	"Críticas"; class. semi-aut. por análise textural p/ detectar pátios + buffer "Stutis"; interpretação visual e vetorização (2013) FG: Análise de mistura espectral CS: dados do estudo anterior (2007)	(2013) CS: 92,9% FG: 95,8%		
INPE (2008)	Amazônia legal, Brasil 2007-2008 MODIS	Foto-interpretação da imagem considerando tonalidade, textura e contexto como elementos para a indicação da alteração da cobertura do solo.	Auditoria por análise das imagens mapeadas com imagens Landsat 5/TM.	Não detecta desmatamentos anteriores. Período quinzenal. Detecção de corte raso e degradação florestal.	Detecta desmatamentos superiores a 25 hectares em imagens não cobertas por nuvens.

CS = Corte Seletivo; DM = Desmatamento; FG = Incêndio Florestal; TRFIC = Tropical rain Forest Informaion Center (Michigan State University)