EFEITO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL SOBRE A SÉRIE HISTÓRICA DE MONITORAMENTO DE DESMATAMENTO DA MATA ATLÂNTICA

Felipe de Oliveira Passos [1], Luciana S. Soler [1], Jadson Queiroz da Silva[1], Silvana Amaral [1]

[1] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brazil
felipeo.passos@gmail.com, lusoler@gmail.com, jadson.qds@gmail.com, silvana.amaral@inpe.br

RESUMO

O monitoramento PRODES foi estendido para os demais biomas brasileiros além da Amazônia e Cerrado. O PRODES Brasil disponibilizou uma série histórica de desmatamento da Mata Atlântica (MA) utilizando imagens OLI/Landsat8. A partir desta série, este artigo realiza uma primeira análise sobre o potencial efeito da alteração para sensores de maior resolução espacial e espectral. Considerando 13 células de 758 km², distribuídas na Mata Atlântica, reproduziu-se a metodologia PRODES, utilizando imagens MSI/Sentinel-2 para 2021. Quando comparados aos dados PRODES, os mapeamentos Sentinel-2 produziram maior estimativa de área (158,1%), maior número de polígonos (186,48%) e resultados variando com o contexto de cada local. Nossos resultados preliminares evidenciam a necessidade de uso mosaicos de imagens, para reduzir o efeito de nuvens, e a necessidade de testes estatísticos mais amplos e consistentes para garantir a consistência das estimativas de desmatamento para o monitoramento contínuo da Mata Atlântica.

Palavras-chave *- Sentinel-2, Landsat-8, desmatamento, Mata Atlântica, resolução, PRODES.*

ABSTRACT

PRODES monitoring was extended to the other Brazilian biomes besides the Amazon and Cerrado. PRODES Brazil has made available a historical deforestation series of the Atlantic Forest using OLI/Landsat8 images. Based on this series, this paper performs a first analysis on the potential effect of the change to higher spatial and spectral resolution sensors. Considering 13 cells of 758 km2, distributed in the Atlantic Forest, the PRODES methodology was reproduced using MSI/Sentinel-2 images for 2021. When compared to the PRODES data, Sentinel-2 mapping produced higher area estimates (158,1%), more polygons (186,48%) and results varying with the context of each site. Our preliminary results highlight the need to use image mosaics, to reduce cloud effect, and the need for more extensive and consistent statistical testing to ensure consistency of deforestation estimates for ongoing monitoring of the Atlantic Forest.

Keywords *- Sentinel-2, Landsat-8, deforestation, Atlantic Forest, resolution, PRODES.*

1. INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica (MA) foi uma das maiores florestas tropicais das Américas, originalmente cobrindo cerca de 1,5 milhões de km². O alcance latitudinal deste bioma, em torno de 29°, estende-se por regiões tropicais e subtropicais. A ampla faixa latitudinal, diferenças de altitude e a diminuição da chuva a partir da costa influenciam a variação da composição florística da floresta. A cada fitofisionomia, diferentes ecossistemas conferem heterogeneidade ao bioma [1,2]. As formações florestais da MA foram consideradas patrimônio nacional pela Constituição Federal de 1988, e a Lei da Mata Atlântica (Lei Federal 11.428/2006) [3] regulamenta sua utilização.

Apesar do bioma ser um *hotspot* de biodiversidade [4] e protegido pela legislação, ainda se encontra sob forte pressão antrópica [5] uma vez que 72% da população brasileira habita o bioma [6]. Estima-se que originalmente o bioma cobria uma área de 1.315.460 km², ou cerca de 15% do território brasileiro, em 17 estados brasileiros, além de partes da Argentina e Paraguai. Atualmente a cobertura florestal deste bioma está reduzida a menos de 12,4% de sua extensão original [5], distribuída em fragmentos florestais de diversos tamanhos, muitos não conectados, ameaçando a manutenção da biodiversidade [7,8].

O mapeamento de imagens de satélite constituindo séries temporais é o meio mais eficiente para monitorar as mudanças do uso e cobertura da terra, e o avanço do desmatamento. As séries podem auxiliar no reconhecimento de padrões e na detecção de mudanças associadas a ações antrópicas e naturais [9,10]. Desde 1990, a Fundação SOS Mata Atlântica em parceria com o INPE realiza o mapeamento que compõe o Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica, utilizando imagens Landsat.

Para atender à estratégia nacional de REDD+, mecanismo de pagamentos por emissões evitadas de Gases de Efeito Estufa (GEE) por redução de desmatamento e degradação florestal, a fim de consolidar esforços para cumprir as metas previstas na Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC). O Ministério do Meio Ambiente (MMA) publicou a Portaria 365/2015, que estabelecia o Programa de Monitoramento Ambiental dos Biomas (PMABB), o qual tem entre seus objetivos a construção de séries históricas de mapas e monitoramento anual do desmatamento nos biomas Caatinga, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal, assim como realizado para a Amazônia e Cerrado. O PRODES Mata Atlântica mapeou o desmatamento em base bianual entre os

anos de 2000 a 2016, e anual entre 2017 e 2022.

O sistema PRODES, além de estendido para todos os biomas brasileiros, deverá inovar sua metodologia, com uso de inteligência artificial e gradual adoção de sensores de melhor resolução, como o MSI/Sentinel-2. A mudança efetiva para novas plataformas representa um desafio para a manutenção da série histórica. Deve-se garantir a acurácia e qualidade dos resultados, em especial em um bioma tão extenso, diverso e fragmentado como a MA [13,14].

Com o advento de nuvens de dados, e em especial de imagens de novos sistemas de melhor resolução espectral e espacial, novos produtos estão disponíveis, com melhor detalhamento e frequência temporal [15,16]. Contudo, poucos estudos relatam o efeito da substituição das imagens do sistema de monitoramento por dados de melhor resolução sobre a estimativa de área detectada.

Neste contexto, este trabalho propõe uma avaliação inicial do efeito da substituição de imagens OLI/Landsat8 por MSI/Sentinel-2, na detecção e estimativa de desmatamento da Mata Atlântica, considerando a série histórica e a metodologia básica do sistema PRODES MA.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliar os efeitos da substituição das imagens para a detecção do desmatamento da MA, o mesmo procedimento do PRODES Mata Atlântica foi reproduzido em algumas áreas teste referentes ao ano de 2021, com imagens MSI/Sentinel-2 para a detecção e delineamento dos polígonos.

Considerando-se a variabilidade latitudinal, as diferentes fitofisionomias da Mata Atlântica, e as regiões com maior densidade de polígonos de desmatamento para o ano de 2021, foram selecionados 13 pontos como áreas teste (Figura 1). Dados de desmatamento acumulados até 2016, correspondentes à linha de base para o PRODES-MA (máscara de desmatamento), disponível na plataforma TerraBrasilis [17], foram utilizados para auxiliar na escolha das áreas. Cada ponto corresponde a uma célula usualmente interpretada no PRODES e equivale a 758 km².

Foram utilizadas imagens MSI/Sentinel-2 (10m), disponibilizadas pela ESA (*European Space Agency*) em https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home e adquiridas através do Google Earth Engine. As passagens foram selecionadas observando-se as datas mais próximas do mapeamento PRODES-MA e de menor cobertura de nuvens possível. Como no PRODES-MA o desmatamento é detectado em composição colorida - R5G6B4 (OLI/Landsat8), foram selecionadas as bandas MSI do espectro óptico equivalentes: B8 (Infravermelho próximo), B11 (Infravermelho médio), e B4 (Vermelho), para composição equivalente R8G11B4. A resolução espacial de 10 metros foi mantida através de reamostragem utilizando o método *default* do Google Earth Engine (*Nearest Neighbour*). Para cada ponto pré-selecionado foram adquiridas uma cena (*tile*) para o ano 2020 e outra para 2021.

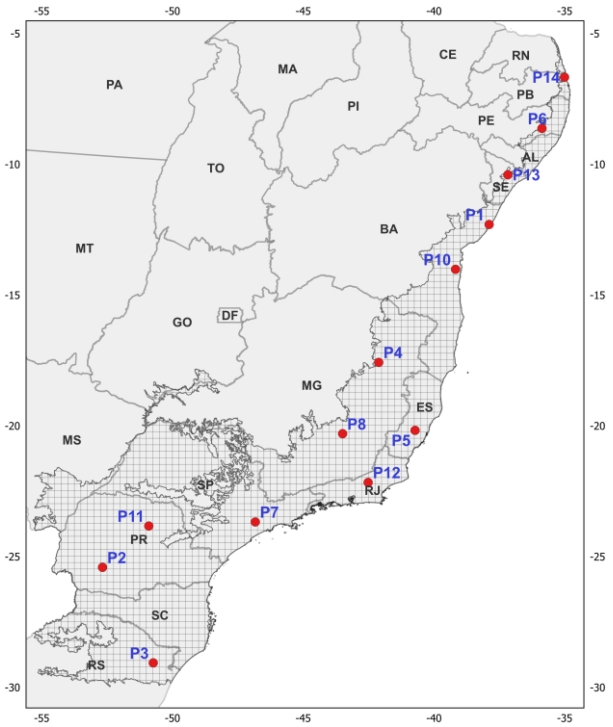

Figura 1. Área de estudo - células (pontos vermelhos) selecionadas para avaliação no bioma Mata Atlântica.

O software TerraAmazon foi utilizado no processamento das imagens, na interpretação e detecção do desmatamento. Após a ingestão das imagens, realizou-se um contraste por ajuste de histograma para evidenciar as feições da vegetação. Um banco de dados georreferenciado sistematizou as imagens, mapas de referências e as regras topológicas.

A área mínima de mapeamento adotada foi de 1 hectare. O mapeamento foi realizado por interpretação visual em escala mínima de 1:75.000, comparando-se as imagens dos dois períodos, observando-se as áreas não cobertas pela máscara de desmatamento de 2020. A análise dos resultados deu-se por comparação de área, número de polígonos e limites, aos obtidos pelo mapeamento do PRODES-MA.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área total de mapeamento, considerando as 13 áreas amostradas, foi de 9.854 km². Nestas áreas, para 2021, foram detectados 592 polígonos que correspondem a 23,37 km² de desmatamento a partir das imagens OLI/Landsat 8, pelo PRODES-MA. Utilizando-se da mesma metodologia e escala de mapeamento, a partir de imagens MSI/Sentinel-2, foram mapeados 1104 polígonos, contabilizando 36,94 km² de desmatamento (Tabela 1).

O número total de polígonos de desmatamento nas imagens Sentinel-2 foi superior ao observado nas imagens Landsat (diferença de 186,48%). Em todos os pontos, exceto o 14, o percentual de polígonos detectados nesse sensor foi muito superior, variando de 132,43% a 311,11%. Estes resultados

estão relacionados principalmente à melhor resolução espacial das imagens Sentinel. Em geral, as feições de desmatamento de pequenos tamanhos são mais evidentes nas imagens Sentinel, como plantios comerciais de *Pinus sp* e *Eucalyptus sp*, os quais são mais distinguíveis das florestas nativas em imagens desta plataforma, e assim, mais difíceis de mapear com imagens OLI/ Landsat.

PONTO /UF	MSI/ SENTINEL			OLI/LANDSAT8			DIFERENÇAS SENTINEL-2 - LANDSAT-8			
	TILE	ÁREA (km²)	POL (n)	CENA	ÁREA (km²)	POL (n)	ÁREA (km²)	ÁREA (%)	POL (n)	POL (%)
3/RS	22JEN	16,16	297	221/80	12,98	223	3,18	124,46	74	133,18
10/BA	24LUJ	2,34	57	216/70	0,65	22	1,7	362,58	35	259,09
2/PR	21JZM	2,42	119	223/78	0,99	43	1,44	245,94	76	276,74
5/ES	24KUC	2,8	168	216/74	1,39	83	1,41	201,58	85	202,41
6/PE	24LZR	2,23	81	214/66	0,93	30	1,3	240,1	51	270
4/MG	23KQV	2,14	73	217/73	0,93	33	1,2	229,04	40	221,21
8/MG	23KPT	2,79	102	217/74	1,81	34	0,98	153,96	68	300
12/RJ	23KQR	1,34	36	217/75	0,64	21	0,7	210,21	15	171,43
11/PR	22KEU	1,74	49	222/76	1,21	37	0,54	144,55	12	132,43
7/SP	23KLP	1,04	51	219/76	0,56	23	0,48	185,23	28	221,74
13/SE	24LYP	0,87	28	215/67	0,37	15	0,5	233,42	13	186,67
1/BA	24LWM	0,75	28	215/69	0,59	9	0,17	128,39	19	311,11
14/PB	25MBM	0,32	15	214/65	0,32	19	0	100,78	-4	-21,05
TOTAL		36,94	1104		23,37	592	13,6	158,1	512	186,48

Tabela 1. Área (km²) e polígonos (número) de desmatamento detectados em imagem MSI/Sentinel-2 e OLI/Landsat para a Mata Atlântica em 2021.

Quanto às diferenças de área, apenas em um ponto (14/PB) a área de desmatamento segundo mapeamento Sentinel-2 foi igual ao registrado nas imagens Landsat. Este resultado foi afetado possivelmente devido à alta frequência de nuvens na imagem Sentinel-2 utilizada (Tabela 2).

	MSI /SENTINEL				OLI/LANDSAT				COBERTURA
PONTO	MIN	MAX	MEDIANA	MÉDIA	MIN	MAX	MEDIANA	MÉDIA	APROX. DE NUVENS
3	0.010	0.596	0.024	0.054	0.008	0.991	0.024	0.058	30%
10	0.010	0.137	0.032	0.041	0.005	0.073	0.023	0.029	30%
2	0.010	0.144	0.016	0.020	0.010	0.074	0.016	0.023	0%
5	0.010	0.092	0.014	0.016	0.006	0.076	0.015	0.017	0%
6	0.010	0.187	0.021	0.028	0.010	0.096	0.024	0.031	50%
4	0.010	0.114	0.021	0.029	0.010	0.093	0.018	0.028	0%
8	0.010	0.202	0.019	0.027	0.010	0.329	0.031	0.053	20%
12	0.012	0.101	0.028	0.037	0.014	0.071	0.025	0.030	0%
11	0.010	0.105	0.031	0.036	0.010	0.140	0.025	0.032	20%
7	0.010	0.069	0.015	0.020	0.010	0.056	0.021	0.024	20%
13	0.010	0.176	0.020	0.031	0.012	0.086	0.017	0.025	0%
1	0.010	0.115	0.018	0.027	0.013	0.288	0.031	0.065	20%
14	0.011	0.031	0.022	0.021	0.010	0.058	0.014	0.017	80%

Tabela 2. Estatísticas de desmatamento e cobertura aproximada de nuvens das imagens Sentinel.

A maior resolução das imagens Sentinel-2 aumenta a precisão na definição das características da paisagem, o que torna mais precisa a detecção do desmatamento em áreas abertas naturais não arbóreas. Como exemplo, podemos destacar o ponto P3-RS na região sul da Mata Atlântica que possui um predomínio de campos de altitude. Nesta área, houve a maior diferença entre Sentinel e Landsat. Foram 3,18 km² de área mapeada na imagem Sentinel a mais do que na imagem Landsat. Isto pode ser explicado pela maior resolução espacial da imagem Sentinel que permitiu diferenciar o desmatamento de campos de altitude mais adequadamente em relação à imagem Landsat.

Além da possibilidade de se delimitar polígonos de maneira mais precisa em imagens Sentinel, eventualmente, há a detecção de polígonos não mapeados a partir da imagem Landsat (Figura 2), e o inverso também foi observado. Isto pode ser explicado por diferentes fatores como pequenas diferenças nas datas de aquisição das imagens, na sazonalidade local, nos efeitos de influência atmosférica e numa maior chance de falsos positivos ou falsos negativos com o aumento da resolução espectral.

O Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica para o período de 2020-2021 avaliou 86,8% da Área de Aplicação da Lei da MA: 11,2% parcialmente, pela cobertura por nuvens e 2,1% pela indisponibilidade de imagens livre de nuvens. Nesta edição, o Atlas substituiu o mapeamento até então realizado com imagens Landsat por imagens Sentinel-2 [18]. Da avaliação dos autores, os resultados indicaram que o mapeamento a partir de imagens Sentinel-2 aumentou em até 7% a área de desmatamento em comparação com o que seria identificado com imagens Landsat. Este valor foi considerado adequado, uma vez que foi computado um aumento total de 66% do desflorestamento para o período.

Neste trabalho obtivemos resultado semelhante ao do Atlas, mas com maior intensidade: aumento de aproximadamente três vezes a área estimada. Isto pode estar associado às áreas de atividade antrópicas como agricultura, não são tão evidentes nas imagens Landsat. Este resultado corrobora os dados apresentados em estudos de áreas agrícolas, onde em decorrência da maior resolução espectral em imagens Sentinel, há maior quantidade de informação sobre o estado da vegetação [19].

A resolução espacial do MSI/Sentinel-2 possibilita melhor definição dos alvos de interesse, como observado por Shimaburo e Ponzoni [20]. Avaliando-se a definição de alvos por diferentes sensores, as diferenças se justificam pela maior chance de haver *pixels* puros quanto melhor for a resolução espacial. Neste trabalho, com o uso das imagens Sentinel-2, observou-se uma redução na mistura espectral entre alvos de interesse, o que permitiu uma melhor definição e distinção dos mesmos.

5. CONCLUSÕES

A análise dos dados, mostrou que para determinadas feições, principalmente áreas agrícolas e reflorestamentos, imagens do sensor MSI/Sentinel-2 se destacam em relação ao sensor OLI/Landsat-8. É possível identificar um número maior de alvos e melhor traçar seus limites.

Este trabalho apresenta um primeiro exercício de comparação do uso das imagens MSI/Sentinel-2 em substituição ao OLI/Landsat-8, que deverá ser adotado no PRODES Mata Atlântica. Os resultados nos levam principalmente a duas considerações: 1) a necessidade de se trabalhar com mosaico de imagens para contornar a restrição da cobertura de nuvens, o que poderá ser feito utilizando-se

cubos de dados do Brazil Data Cube; 2) é necessário quantificar com rigor estatístico as diferenças que serão apresentadas nos cálculos de área desmatada para garantir a consistência da série histórica do monitoramento. Para tanto, sugere-se delinear um procedimento amostral que leve em consideração não apenas a distribuição dos pontos ao longo do gradiente de fitofisionomias da Mata Atlântica, mas também os diferentes intervalos de tamanho de polígonos, com réplicas.

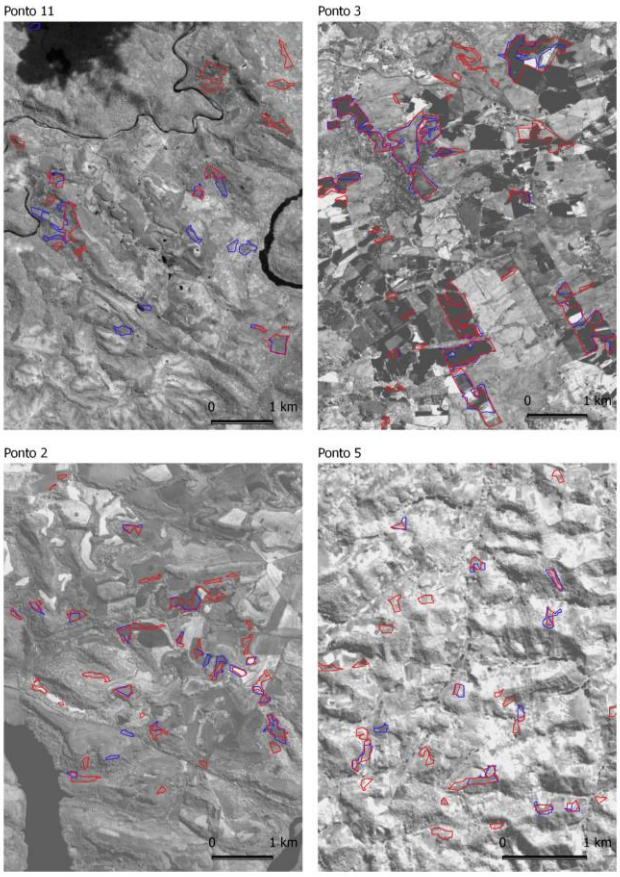

Figura 2. Desmatamentos identificados nas imagens MSI/Sentinel (vermelho) e OLI/Landsat (azul) sobrepostos à banda 11 MSI/Sentinel a)11/PR; b) 2/PR; c) 8/MG e d) 3/RS

Conclui-se que a inovação e o esforço contínuo em aprimorar o mapeamento de desmatamento na Mata Atlântica são possíveis utilizando-se de novos sensores e técnicas de sensoriamento remoto disponíveis. Contudo, é necessário avaliar criteriosamente os efeitos das alterações sobre as estimativas de perda florestal de modo a se garantir a qualidade do mapeamento e a consistência das séries temporais.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico através do projeto de processo 444418/2018-0 e bolsa 382239/2022-9, com o apoio do INPE. Ao apoio da FUNCATE em especial à Fernanda Baruel, Clotilde Ferri e Rondnei Barros. Á colaboração da equipe PRODES Mata Atlântica, Rodrigo Silva do Carmo e Raquel Zózimo Molinez.

6. REFERÊNCIAS

[1] Carvalho, S. I.; NERY, J. **Influência da variabilidade climática na dinâmica da vegetação natural do bioma Mata Atlântica – abordagem multitemporal**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.9, n.4, p.351-361, 2018. DOI: http://doi.org/10.6008/CBPC2179- 6858.2018.004.0028

[2] Ponzoni, F.J. & Moreira-Pessôa, A.C. 2015. **Análise temporal da ação antrópica sobre diferentes fitofisionomias da Mata Atlântica nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17º. Anais. João Pessoa, SBSR/INPE.

[3] BRASIL. LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências.** Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm. Acesso em: 15 jun. 2014.

[4] Mittermeier, Russell A., ed. 2004. **Hotspots revisited: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions**. 1. Engl. Ed . Mexico: CEMEX.

[5] ATLÂNTICA, SOS Mata *et al*. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica. Período 2020–2021.** Relatório técnico. São Paulo. 2022.].

[6] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em http://www.ibge.gov.br/home, Rio de Janeiro, 2015.

[7] Mendoza, J. E.; Etter, A. **Multitemporal analysis (1940-1996) of land cover changes in the southwestern Bogotá highplain (Colombia)**. Landscape and Urban Planning, v. 59, p. 147-158, 2002.

[8] De Arruda Ramos, Escarlett; NUVOLONI, Felipe Micali; DO NASCIMENTO LOPES, Elfany Reis. **Landscape Transformations and loss of Atlantic Forests: challenges for conservation. Journal for Nature Conservation**, v. 66, p. 126152, 2022.

[9] Freitas, RM de *et al*. **Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America.** Journal of Computational Interdisciplinary Sciences, v. 2, n. 1, p. 57-68, 2011.

[10] Kuplich, Tatiana M.; Moreira, Andreise e Fontana; Denise C. **Série temporal de índice de vegetação sobre diferentes tipologias vegetais no Rio Grande do Sul.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental [online]. 2013, v. 17, n. 10 [Acessado 13 Outubro 2022] , pp. 1116-1123. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001000014>. Epub 09 Out 2013. ISSN 1807-1929. https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001000014.

[13] Li, S. *et al*. (2017). **Sentinel-2 MSI Radiometric Characterization and Cross-Calibration with Landsat-8 OLI.** Advances in Remote Sensing, 6(2): 147-159.

[14] Bezerra, A. U. *et al*. (2018). **Comparison of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Between the Sensors OLI-Landsat Satellite-8 and MSI-Sentinel-2 Satellite in Semi-Arid Region.** Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ. 41. 167-177. 10.11137/2018_3_167_177.

[15] Novo, Evlyn Márcia Leão de Moraes *et al*. **Técnicas avançadas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo de mudanças climáticas e ao funcionamento dos ecossistemas amazônicos.** Acta Amazonica [online]. 2005, v. 35, n. 2 [Acessado 13 Outubro 2022] , pp. 259-272. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000200016>. Epub 17 Out 2005. ISSN 1809-4392. https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000200016.

[16] Sothe, C. *et al*. **Evaluating Sentinel-2 and Landsat-8 Data to Map Sucessional Forest Stages in a Subtropical Forest in Southern Brazil.** *Remote Sens.* **2017**, *9*, 838. https://doi.org/10.3390/rs9080838

[17] Assis, L. F. F. G. *et al*. **TerraBrasilis: A Spatial Data Analytics Infrastructure for Large-Scale Thematic Mapping.** ISPRS International Journal of Geo-Information. 8, 513, 2019. DOI: 10.3390/ijgi8110513

[18] Pinto, Luis Fernando & Amaral, Silvana & Hirota, Márcia & Almeida, Claudio. (2022). **Atlas da Mata Atlantica 2022 relatorio tecnico.**

[19] Feio, S. V. M. **Análise multitemporal de imagens do satélite Sentinel-2 como suporte à elegibilidade das ajudas comunitárias agrícolas. 2017.** 66f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Cartográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, 2017.

[20] Shimabukuro, Y. E.; PONZONI, F. J. **Mistura Espectral: modelo linear e aplicações.** Oficina de Textos, 2017.