



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PERÍCIAS CRIMINAIS AMBIENTAIS

Iris de Freitas Medeiros

Análise temporal da cobertura florestal em bacias hidrográficas por meio de índices espectrais

Florianópolis

2023

Iris de Freitas Medeiros

Análise temporal da cobertura florestal em bacias hidrográficas por meio de índices espectrais

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Perícias Criminais Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl

Florianópolis

2023

Medeiros, Iris de Freitas

Análise temporal da cobertura florestal em bacias hidrográficas por meio de índices espectrais / Iris de Freitas Medeiros ; orientador, Roberto Fabris Goerl, 2023.

81 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Biológicas, Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Perícias Criminais Ambientais. 2. Sensoriamento remoto. 3. Índices espectrais. 4. Cobertura florestal. 5. Precipitação. I. Goerl, Roberto Fabris. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais. III. Título.

Iris de Freitas Medeiros

Análise temporal da cobertura florestal em bacias hidrográficas por meio de índices espectrais

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 8 de dezembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Carlos José de Carvalho Pinto
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Dra. Michele Monguilhott
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Perícias Criminais Ambientais.

Prof. Dr. Carlos Henrique Lemos Soares

Coordenador do Programa

Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl

Orientador

Florianópolis, 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela vida e por sempre guiar o meu caminho.

À minha mãe Sayonara, meu pai José Márcio e meu irmão Caetano, que foram compreensivos com as minhas ausências, sempre incentivaram e acreditaram no meu crescimento profissional e ensinaram a importância dos estudos.

Ao Thiago, meu parceiro de vida, que foi o maior incentivador desde o início do curso: obrigada por acreditar em mim mesmo quando eu não acreditei e não me deixar desistir; obrigada por segurar a minha mão não só nos momentos de felicidade e conquistas, mas também em momentos de angústia e dificuldades.

Ao Lucas que, ainda no ventre, me deu forças para encerrar esta etapa.

Aos amigos Bruna, Lennon e Gustavo, que me auxiliaram desde a fase de processo seletivo até a execução da pesquisa e sempre estiveram dispostos a ajudar de alguma forma.

Aos amigos Caroline, Fabiana, Igor e Mariana agradeço a parceria e por tornarem meus dias mais leves: obrigada por estarem sempre me esperando com um abraço e um lanchinho.

Ao professor Roberto, agradeço a paciência, orientação, disponibilidade, ensinamentos e conversas ao longo desta jornada.

RESUMO

Entre as diversas ferramentas existentes no sensoriamento remoto, os índices espectrais de vegetação têm sido bastante utilizados para o monitoramento e análise da cobertura florestal, e caracterizam a vegetação de acordo com a energia refletida. A presente pesquisa buscou analisar alterações da cobertura florestal na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul por meio de índices espectrais de vegetação (NDVI, EVI, GNDVI e OSAVI) obtidos a partir de imagens do satélite Sentinel-2. Para isso, primeiramente foi avaliada a importância do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro (PAEST) para a preservação florestal através do estudo de mapas de uso e cobertura do solo em algumas unidades hidrográficas localizadas dentro e fora da unidade de preservação no período entre 1985 e 2021. Para esta etapa, foi utilizada a classificação do uso do solo do Projeto Mapbiomas, a qual foi reagrupada em novas classes. Em seguida, após o cálculo dos índices espectrais entre 2018 e 2022, as imagens foram reclassificadas a fim de verificar as alterações ocorridas em cada classe dos índices no local de estudo. Por fim, visando analisar o comportamento da cobertura florestal em períodos de variabilidade hídrica, foram calculados o desvio padrão, média e moda dos índices espectrais, os quais foram comparados com dados de precipitação na região de estudo. Os mapas de uso do solo entre 1985 e 2021 permitiram observar a evolução da urbanização na Bacia Hidrográfica e a importância do Parque para a preservação da cobertura florestal, no entanto, os índices espectrais escolhidos não se mostraram adequados para mostrar as alterações ocorridas. Com relação ao comportamento espectral em períodos de variações de precipitação, os índices não demonstraram sensibilidade ao estresse hídrico no período analisado, mostrando que a localização e o uso do solo têm maior influência nos índices espectrais.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul, cobertura florestal, sensoriamento remoto, índices espectrais, precipitação.

ABSTRACT

Among the many remote sensing tools, spectral vegetation indices, have been extensively used for forest cover monitoring and analysis through classification of the reflected energy. This work aimed to analyze forest cover changes on the Cubatão do Sul river basin using spectral vegetation indices (NDVI, EVI, GNDVI and OSAVI) obtained from Sentinel-2 satellite imagery. The importance of the Serra do Tabuleiro State Park (PAEST) for forest conservation was assessed by analyzing land use and cover maps from some watersheds within and outside the park perimeter between 1985 and 2021. To this end, the land use classification from MapBiomas Project was employed, which was regrouped in new classes. After the calculation of spectral indices from 2018 to 2022, the images were reclassified to identify the changes in each index class on the studied area. Lastly, the behavior of the forest cover in periods of water availability variance was analyzed using the spectral indices' standard deviation, average and mode, which were compared to precipitation data from area. The evolution of urbanization in the river basin and the importance of the Park for forest cover preservation were noticeable when analyzing the land use maps from 1985 to 2021. However, the selected spectral indices were not adequate to demonstrate these changes. These indices also did not show sensitivity to water stress in the analyzed timeframe, indicating that the location and land use have more influence on the results.

Keywords: Cubatão do Sul river basing, forest cover, remote sensing, spectral indices, precipitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento espectral da vegetação.....	23
Figura 2 – Regiões hidrográficas de Santa Catarina.....	32
Figura 3 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul no estado de Santa Catarina	33
Figura 4 – Área da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul pertencente ao Parque Estadual da Serra do Tabuleiro.....	34
Figura 5 – Sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul	36
Figura 6 – Bacias selecionadas e não selecionadas para o estudo	41
Figura 7 – Cobertura e uso do solo em 1985	45
Figura 8 – Cobertura e uso do solo em 2021	46
Figura 9 –Evolução do uso e cobertura do solo dentro e fora dos limites do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro.....	46
Figura 10 – Mapa das classes de NDVI em 11/12/2018	50
Figura 11 – Mapa das classes de NDVI em 28/07/2022	50
Figura 12 – Área (km ²) de cada classe de NDVI em 11/12/2018 e em 28/07/2022 ..	51
Figura 13 – Localização das unidades hidrográficas.....	52
Figura 14 – Precipitação mensal e precipitação média na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul no período entre janeiro de 2018 e maio de 2022	53
Figura 15 – Gráficos de desvio padrão dos índices espectrais na região de estudo da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul	54
Figura 16 – Desvio padrão dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas dentro do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro	55
Figura 17 – Desvio padrão dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas fora do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro	56
Figura 18 – Desvio padrão dos índices espectrais de vegetação da unidade hidrográfica 3 e precipitação mensal na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul.	57
Figura 19 – Desvio padrão dos índices espectrais de vegetação da unidade hidrográfica 9 e precipitação mensal na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul.	58
Figura 20 – Desvio padrão dos índices espectrais de vegetação da unidade hidrográfica 1 e precipitação mensal na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul.	59
Figura 21 – Moda dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas dentro do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro	61

Figura 22 – Moda dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas fora do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro	61
Figura 23 – Média dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas dentro do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro	62
Figura 24 – Média dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas fora do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos satélites da Missão Sentinel	31
Tabela 2 – Características das bandas do sensor MSI	31
Tabela 3 – Classes utilizadas para os intervalos de valores de NDVI.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 A MATA ATLÂNTICA E OS RECURSOS HÍDRICOS	13
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 SENSORIAMENTO REMOTO: DEFINIÇÃO E BREVE HISTÓRICO	17
3.2 UTILIZAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA A ANÁLISE DA COBERTURA FLORESTAL	18
3.3 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO	20
3.3.1 NDVI	23
3.3.2 EVI	25
3.3.3 GNDVI	28
3.3.4 OSAVI	29
3.4 MISSÃO SENTINEL	30
4 ÁREA DE ESTUDO	32
4.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUBATÃO DO SUL	32
4.1.1 Localização e hidrografia	32
4.1.2 Clima e vegetação	36
4.2 PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO TABULEIRO	38
5 MATERIAIS E MÉTODOS	40
5.1 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DAS IMAGENS	40
5.1.1 Influência do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro	41
5.1.2 Análise da influência do regime hídrico	43
5.1.3 Sensibilidade dos índices espectrais	43
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
6.1 COBERTURA E USO DO SOLO NAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS SELECIONADAS	45
6.2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO E A VARIABILIDADE HÍDRICA	52
6.3 SENSIBILIDADE DOS ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO	60
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
REFERÊNCIAS	69

ANEXO A – Mapas de uso e cobertura do solo das unidades hidrográficas selecionadas na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul nos anos 1991, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020.....	75
ANEXO B – Mapas das classes de EVI, GNDVI e OSAVI em 11/12/2018 e 28/07/2022.	79

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e o crescimento populacional mundial resultaram no desmatamento de grandes áreas de florestas naturais para a implantação de indústrias, centros comerciais, empreendimentos imobiliários, culturas agrícolas e pastagens, visando suprir as demandas de alimentos e moradias para a população (LINHARES et al., 2005). Estas alterações na cobertura florestal ocasionam impactos no meio ambiente e na disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos e no clima, podendo alterar a temperatura global e o regime de precipitações e, por consequência, agravando o suprimento de água e energia nas cidades, levando a situações de racionamento pela população (LINHARES et al., 2005; TUCCI; CLARKE, 1997).

De acordo com Lino e Dias (2003), é importante conhecer o ciclo hidrológico na floresta para compreender a relação floresta-água. Os autores descrevem este ciclo da seguinte maneira:

A água da chuva que se precipita sobre uma mata, segue dois caminhos: volta à atmosfera por evapotranspiração ou atinge o solo, através da folhagem ou do tronco das árvores. Na floresta, a interceptação da água acima do solo garante a formação de novas massas atmosféricas úmidas, enquanto a precipitação interna, através dos pingos de água que atravessam a copa e o escoamento pelo tronco, atingem o solo e o seu folheto. De toda a água que chega ao solo, uma parte tem escoamento superficial, chegando de alguma forma aos cursos d'água ou aos reservatórios de superfície. A outra parte sofre armazenamento temporário por infiltração no solo, podendo ser liberada para a atmosfera através da evapotranspiração, manter-se como água no solo por mais algum tempo ou percolar como água subterrânea. De qualquer forma, a água armazenada no solo que não for evapotranspirada, termina por escoar da floresta paulatinamente, compondo o chamado deflúvio, que alimenta os mananciais hídricos e possibilita os seus usos múltiplos. (LINO; DIAS, 2003, p.26).

Colman (1953), complementando os autores supracitados, diz que cada parte da estrutura da floresta possui uma função no ciclo hidrológico. O dossel (estrato superior) e a liteira interceptam a água da chuva, reduzindo o impacto no solo e controlando a infiltração da água. A vegetação tende a reduzir a velocidade do escoamento da água, proporcionando maior tempo de infiltração e maior taxa de absorção. Além disso, as raízes têm importante função na estabilização de encostas e no direcionamento do escoamento da água abaixo do solo, absorvendo a água que voltará à atmosfera e promovendo o aumento da permeabilidade do solo.

As florestas têm importante função na manutenção do fluxo e volume de água em uma bacia hidrográfica, entre as quais está a proteção de mananciais e a produção de água (LINHARES et al., 2005). Grande parte da precipitação que chega na floresta é retida pelas folhas, evaporando quando ocorre capacidade potencial para isso. A parte da precipitação que atinge o solo pode infiltrar, percolando para o aquífero, ou pode escoar superficialmente. A água que chega ao aquífero é transportada até os rios, criando condições de mantê-los nos períodos de longa estiagem (TUCCI; CLARKE, 1997).

Quando ocorre o desmatamento de florestas nas bacias hidrográficas, a capacidade de infiltração tende a diminuir, resultando em maior escoamento superficial e, conseqüentemente, aumento dos processos erosivos, assoreamento e poluição de cursos d'água (ANDREOLI et al., 2003).

Makarieva e Gorshkov (2007) propuseram a teoria da bomba biótica, a qual diz que as florestas facilitam o transporte das chuvas do oceano para o interior do continente através da circulação atmosférica. Segundo os autores, a umidade evaporada da condensação da cobertura florestal (evapotranspiração) cria áreas com baixa pressão, gerando gradientes de energia que, com as diferenças de evaporação da superfície, aceleram a intensidade dos ventos. Dessa forma, uma região com cobertura florestal evapora mais água e absorve os ventos do mar para a terra, transportando a precipitação por grandes distâncias. Quando ocorre a remoção das florestas, o continente absorve menos umidade, fazendo com que ocorra a inversão da direção dos ventos e, por consequência, seca no interior do continente.

1.1 A MATA ATLÂNTICA E OS RECURSOS HÍDRICOS

A Mata Atlântica, bioma encontrado em todo o estado de Santa Catarina, foi reconhecida como Patrimônio Nacional pela Constituição Federal de 1988 e, apenas com a Lei da Mata Atlântica (Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, a qual substituiu o Decreto Federal nº 750, de 10 de fevereiro de 1993) e o Decreto Federal nº 6.660, de 21 de novembro de 2008, teve sua proteção e utilização regulamentada. Como consequência, seus recursos naturais foram explorados descontroladamente por muitas décadas, e hoje são encontrados apenas fragmentos florestais em estágios

de sucessão variados e poucos remanescentes de floresta primária (Fundação SOS Mata Atlântica, 2022a).

A partir dos preceitos estabelecidos pela legislação vigente, a intervenção no bioma, a utilização dos seus recursos e a sua supressão passaram a ser restritas, dependendo de análise de cada situação e autorização prévia por órgãos ambientais. Apesar dos entraves criados pelas leis, de acordo com o Relatório Anual da Fundação SOS Mata Atlântica (2022), o período entre 2020 e 2021 apresentou um aumento do desflorestamento de 66% do bioma Mata Atlântica em relação ao período de 2019 e 2020 e 90% quando comparado ao período de 2017 a 2018.

As bacias hidrográficas localizadas em algumas regiões do bioma Mata Atlântica, como as encontradas nas regiões de São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ) e Curitiba (PR), têm apresentado aumento nos índices de escassez hídrica, o que pode ser explicado pelo grande consumo de água em diferentes atividades econômicas, altas concentrações demográficas e baixa disponibilidade de água potável para consumo. As principais causas do déficit de água potável são a má gestão de resíduos sólidos, o uso de defensivos agrícolas, o desmatamento e o uso inadequado do solo (Fundação SOS Mata Atlântica, 2022b).

De acordo com Doubrawa (2007), o governo do estado de Santa Catarina decretou estado de emergência devido à estiagem em 2004, 2005 e 2006, com respectivamente 152, 182 e 194 municípios apresentando crises de abastecimento e impactos na economia como consequência da deficiência hídrica. Segundo a autora, na região oeste do estado, devido ao histórico de exploração e degradação excessiva dos recursos naturais para exploração de araucária, erva-mate e supressão da vegetação para implantação de atividades relacionadas à agropecuária, restaram poucos remanescentes de Mata Atlântica, trazendo graves consequências relacionadas à disponibilidade de água potável no ecossistema local. Em sua pesquisa, Doubrawa (2007) concluiu que as estiagens ocorridas entre 2003 e 2006 na área de seu estudo estavam relacionadas com a redução das áreas de remanescentes florestais, a qual interfere diretamente no regime de chuvas e no ciclo hidrológico.

A Região Metropolitana de Florianópolis também sofreu graves problemas relacionados ao abastecimento hídrico entre os anos de 2019 e 2020, quando os

volumes de chuva ficaram abaixo da média histórica e massas de ar seco (sistemas de alta pressão) predominaram por longos e atípicos períodos em todo o estado de Santa Catarina. Na época, os rios atingiram níveis extremamente baixos e a situação foi agravada como resultado da redução da recarga natural dos aquíferos que mantêm os cursos d'água (MIRANDA JUNIOR et al., 2020).

Para auxiliar na preservação das nascentes, cursos d'água, equilíbrio climático e de espécies animais e vegetais da Mata Atlântica, foi criado o Parque Estadual da Serra do Tabuleiro, maior unidade de conservação de proteção integral do estado de Santa Catarina, e que se encontra entre as bacias hidrográficas do Rio Cubatão do Sul, do Rio da Madre, do Rio Maciambu, do Rio d'Una e do Rio Tubarão. Porém, ocorrem sérios problemas relacionados à preservação hídrica no parque, devido a atividades carboníferas, agropecuárias, lançamento de resíduos sólidos, desmatamento da mata ciliar, extração de argila e areia nas proximidades, ocasionando o aumento de processos erosivos e prejudicando a qualidade da água disponível (PEREIRA; BENINI, 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem por objetivo geral analisar as alterações ocorridas na cobertura florestal da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul através de índices espectrais de vegetação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar a influência do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro na variabilidade espacial da cobertura florestal;
- Analisar a existência de comportamento distinto na vegetação durante os períodos de variabilidade hídrica, de acordo com os valores dos índices espectrais de vegetação;
- Testar a sensibilidade dos índices espectrais.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 SENSORIAMENTO REMOTO: DEFINIÇÃO E BREVE HISTÓRICO

O termo sensoriamento remoto foi introduzido por Evelyn L. Pruitt na década de 1960, época que ficou conhecida pelo desenvolvimento dos estudos na área de tecnologias espaciais, como consequência da corrida espacial. O primeiro satélite meteorológico a ser lançado no espaço foi o TIROS-1 (*Television Infrared Observation Satellites*), lançado pelos Estados Unidos em 1960. Além de mostrar os padrões das nuvens, ele permitiu perceber alguns aspectos superficiais da Terra, possibilitando, também, aprimorar os estudos relacionados aos sensores dos satélites meteorológicos seguintes. Ainda nos anos de 1960, pela primeira vez, através de um satélite tripulado, foi possível observar e fotografar a superfície terrestre (MENESES et al. 2012).

No Brasil, as pesquisas espaciais tiveram início em 1961 com a criação do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), inicialmente chamado de Grupo de Organização da Comissão Nacional de Atividades Espaciais (GOCNAE). A criação do Instituto foi motivada pela corrida espacial entre a União Soviética (atual Rússia) e os Estados Unidos da América (CÂMARA, 2011).

Entre outros projetos e estudos, na década de 1970 foram realizados os primeiros trabalhos para análise do desmatamento na Amazônia com a utilização do sensoriamento remoto. A partir deste momento, foram lançados programas para detecção de queimadas, monitoramento do desflorestamento da Amazônia e para o monitoramento ambiental dos biomas brasileiros através de imagens de satélites (INPE, 2021).

Acompanhando a evolução do sensoriamento remoto, as técnicas de processamento das imagens de satélite (as quais iniciaram com a manipulação de fotografias feitas a partir de balões) avançaram, atingindo maior nível tecnológico e reduzindo os custos envolvidos. Estes fatores refletiram no aumento do número de usuários destes produtos, como universidades, empresas públicas e privadas e escolas (CROSTA, 1992).

Para Meneses et al. (2012, p. 03), o sensoriamento remoto visa a “obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres”, ou seja, é uma forma de obter imagens da superfície terrestre sem que ocorra o contato físico entre o sensor e o objeto.

Pedrali et al. (2016), corroborando com os autores anteriormente citados, menciona a definição de sensoriamento remoto proposta por Elachi (1987), o qual traz o sensoriamento remoto como uma ciência que adquire informações sobre um alvo (objeto ou área) através da análise de dados coletados a partir da utilização de sensores e sem que ocorra contato com o objeto em questão. De acordo com Novo e Ponzoni (2007), para que a coleta de informações ocorra, são necessários quatro elementos obrigatórios: a radiação eletromagnética, a qual interliga os demais elementos; uma fonte de radiação eletromagnética (Sol, no caso dos estudos relacionados ao meio ambiente); um alvo, sobre o qual deseja-se obter informações; um sensor capaz de registrar a radiação eletromagnética emitida ou refletiva pelo alvo.

Novo (2010), concatenando as definições anteriormente mencionadas, descreve o sensoriamento remoto como:

[...] utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações. (NOVO, 2010, p. 28).

3.2 UTILIZAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA A ANÁLISE DA COBERTURA FLORESTAL

Com o crescente avanço das tecnologias relacionadas ao sensoriamento remoto e, conseqüentemente, com o progresso das técnicas de processamento de imagens, as imagens de satélite têm se tornado grandes aliadas no monitoramento e mapeamento da cobertura vegetal. Ponzoni (2001) afirmou que com o aumento das pesquisas e maior geração de sensores orbitais distribuídos de forma mais acessível aos usuários, as imagens de satélite passaram a contribuir com o mapeamento,

monitoramento, fiscalização e controle de grandes áreas com cobertura vegetal em todo o planeta.

As imagens provenientes de sensoriamento remoto têm sido cada vez mais utilizadas por diversos países a fim de realizar estudos e levantamentos relacionados a recursos naturais, levantamentos geológicos, agrícolas, florestais, oceanográficos, entre outros. Explica-se pela viabilidade de monitorar estes ambientes de forma rápida, eficiente e com periodicidade ideal (CROSTA, 1992). Para Sartori et al. (2009), a principal característica e vantagem do sensoriamento remoto é a possibilidade de sua utilização para acompanhar a dinâmica da cobertura florestal, uma vez que essa tecnologia permite a obtenção de imagens com grande frequência.

Da mesma forma, Poelking et al. (2007) justificaram a utilização do sensoriamento remoto para a análise da cobertura florestal devido à temporalidade e relativo baixo custo para a obtenção das informações. Através da interpretação das imagens de satélite é possível analisar a dinâmica da cobertura do solo e relacioná-la com expansão urbana, desenvolvimento econômico e ações humanas.

Conforme Meneses et al. (2012), a vantagem da utilização das imagens advindas do sensoriamento remoto frente às fotos aéreas dá-se em virtude da captação de imagens da superfície terrestre em um curto espaço de tempo e de forma repetitiva, permitindo o monitoramento das alterações no tempo e de forma remota. Para Kellogg e Zhou (2014), a utilização do sensoriamento remoto pode auxiliar na análise de áreas de difícil acesso e em diferentes períodos, permitindo monitorar e quantificar as condições biofísicas e a distribuição da vegetação.

Quando comparado ao inventário florestal tradicional, o sensoriamento remoto permite a análise e obtenção de informações do alvo através de imagens de diferentes épocas e resoluções espaciais, fornecendo maiores detalhes sobre as alterações ocorridas na cobertura florestal em determinado espaço de tempo (HANSEN et al., 2008). Os dados obtidos de séries temporais têm melhor capacidade para identificar a vegetação e reconhecer padrões ou anomalias associadas a perturbações de origem natural ou antrópica, enquanto imagens de diferentes resoluções espaciais têm suas vantagens com relação à detecção da cobertura do solo e observação das mudanças ocorridas na floresta. Dessa forma, sugere-se a utilização de séries

temporais e imagens de diferentes resoluções em conjunto para análise da dinâmica da cobertura florestal (HUANG et al., 2016; KUPLICH et al., 2013).

Uma vez que as imagens obtidas através do sensoriamento remoto possuem inúmeras informações, faz-se necessário interpretá-las e processá-las para que se tornem mais visíveis e possam ser utilizados apenas os dados adequados conforme a finalidade desejada (CROSTA, 1992).

3.3 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO

Entre as ferramentas do sensoriamento remoto utilizadas para o monitoramento da cobertura florestal estão os índices de vegetação, que caracterizam a cobertura vegetal de acordo com a reflectância (energia refletida). Existem mais de cinquenta tipos de índices, os quais podem ser obtidos, em sua maioria, através de medidas de reflectância nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético (POELKING et al., 2007). Rosa (2007) explica que a maior utilização dessas faixas ocorre por elas possuírem mais de 90% da variação da resposta espectral da vegetação e, conseqüentemente, os índices que utilizam as faixas do vermelho e infravermelho próximo evidenciam o comportamento espectral da vegetação, criando uma relação entre o comportamento espectral e os parâmetros biofísicos da cobertura vegetal.

Os índices de vegetação buscam melhorar as informações espectrais da cobertura vegetal, buscando as faixas espectrais que melhor se relacionam com as propriedades das plantas, sensíveis à deficiência hídrica e de minerais, ataques de pragas, vigor, taxa fotossintética, etc. Assim, diversos índices têm sido desenvolvidos com a finalidade de reduzir ruídos, como a reflectância do solo, efeitos atmosféricos, edificações (BRANDÃO, 2009).

Segundo Vibrans e Schramm (2009), a análise das alterações fenológicas da vegetação através de índices de vegetação obtidos de imagens orbitais é utilizada para a observação dos componentes da paisagem e para o entendimento e indicativo de mudanças. Em nível de bacias hidrográficas, por exemplo, utiliza-se informações sobre as mudanças no comportamento da vegetação para tomadas de decisões relacionadas à gestão de recursos hídricos.

Para Kuplich et al. (2013) os índices de vegetação se relacionam com parâmetros biofísicos da vegetação, como índice da área foliar, vigor, biomassa, porcentagem de cobertura verde e concentração de clorofila. Estes índices são medidas radiométricas adimensionais que realçam o comportamento espectral da vegetação, calculadas a partir da reflectância, ou seja, a relação entre a energia refletida e a energia incidente pelo alvo.

A resposta espectral da vegetação dependerá da sua estrutura celular, ou seja, o comportamento será distinto conforme composição, morfologia e estrutura interna da folha. Dessa forma, a quantidade de energia absorvida e refletida podem variar de uma espécie para outra ou até mesmo dentro da mesma espécie, conforme condições ambientais em que cada indivíduo se encontra, ou seja, alterações de precipitação, nebulosidade, elevação do sol e energia incidente podem influenciar no comportamento espectral da cobertura vegetal (PEDRALI et al., 2016). Para Sartori et al. (2009), a vegetação apresenta diferentes comportamentos espectrais como consequência de deficiência hídrica, ausência de nutrientes e idade da planta.

Novo e Ponzoni (2001) trazem as características relacionadas ao comportamento espectral de uma folha isolada e saudável nas regiões do visível (400 a 700 nm), infravermelho próximo (700 a 1300 nm) e infravermelho médio (1300 a 2600 nm):

- I. Visível (400 a 700 nm): a clorofila, pigmento que possui concentrações variáveis entre espécies e indivíduos, tende a absorver a energia e convertê-la em calor. O pigmento reflete especialmente na faixa de luz verde (500 a 600 nm), e possui máxima absorção nas faixas de luz azul (400 a 500 nm) e vermelha (600 a 700 nm);
- II. Infravermelho próximo (700 a 1300 nm): ocorre baixa absorção da radiação eletromagnética e maior espalhamento da energia na folha. A reflectância é constante, sendo resultado da energia incidente com a estrutura do mesófilo, tecido responsável pela atividade fotossintética na folha. Quanto mais espaçosa for a estrutura interna da folha, maior será o espalhamento da energia incidente e, por conseguinte, maior será a reflectância da folha;

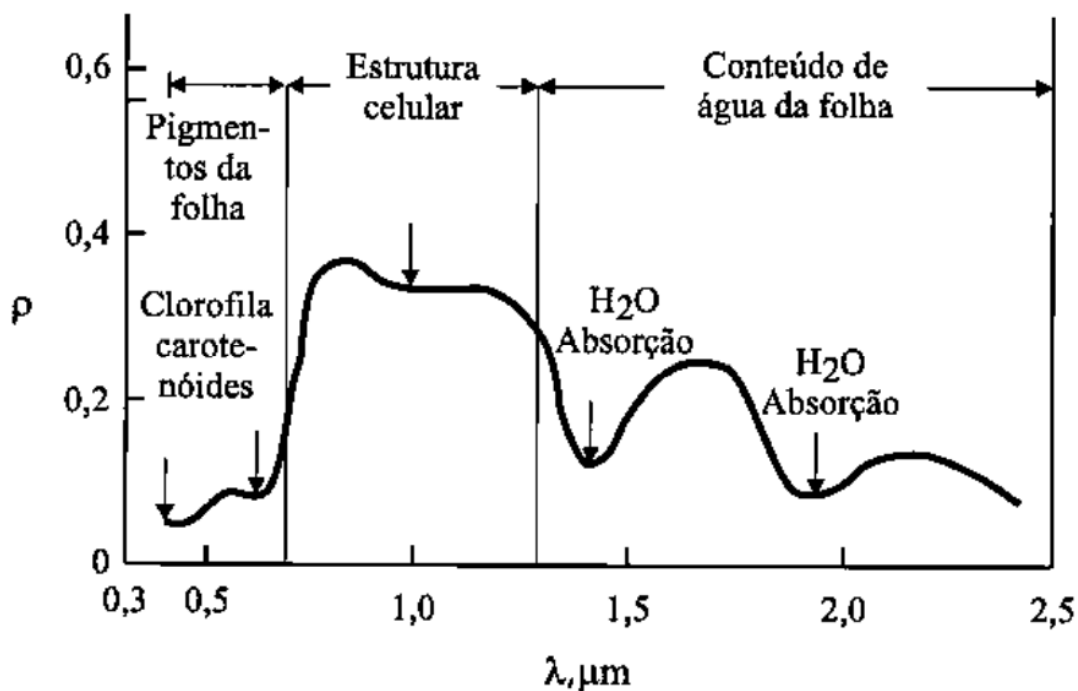
- III. Infravermelho médio (1300 a 2600 nm): a quantidade de água na estrutura foliar influencia a interação com a energia, sendo que a água absorve a radiação eletromagnética nas faixas entre 1300 e 2000 nm.

De forma geral, quando as respostas espectrais das folhas isoladas são extrapoladas para dosséis vegetais, espera-se os mesmos resultados. Assim, em imagens referentes à região do visível, os dosséis apresentarão baixa reflectância e, portanto, coloração mais escura, devido à ação dos pigmentos que absorvem a radiação eletromagnética para realizar a fotossíntese. No infravermelho próximo, os dosséis apresentarão coloração mais clara em função da maior reflectância e espalhamento da radiação eletromagnética no interior das folhas e, por fim, no infravermelho médio, a tonalidade será intermediária, com nova queda nos valores de reflectância, como consequência da água presente na estrutura foliar (NOVO; PONZONI, 2001).

Poelking et al. (2007), complementando, dizem que o valor do índice de vegetação tende a diminuir em períodos de estresse hídrico, visto que a cobertura vegetal com deficiência hídrica absorve menos radiação, aumentando a reflectância na região do visível e a absorção no infravermelho próximo. Segundo Silva et al. (2007), estes índices retratam o vigor da vegetação a partir do contraste entre as bandas do infravermelho próximo e do visível e, embora não sejam utilizados diretamente para medir a umidade do solo, podem ser aplicados no monitoramento desta característica, pois em períodos de déficit hídrico a cobertura vegetal sofre os impactos da falta de água no solo.

Na figura 1, Novo (1989) apresentou o comportamento espectral da vegetação e a relação entre a reflectância (ρ) e o comprimento de onda (μ).

Figura 1 – Comportamento espectral da vegetação



Fonte: Novo, 1989.

A partir do comportamento espectral da vegetação para diferentes comprimentos de onda, conforme dito anteriormente, foram propostos índices que buscam especializar o seu comportamento ao longo do tempo e do espaço. A seguir serão detalhados alguns índices utilizados nesta pesquisa.

3.3.1 NDVI

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi inicialmente proposto por Rouse et al. (1974) com a intenção de criar um índice espectral que separa a vegetação verde e o solo exposto, utilizando dados de sensores acoplados aos satélites. Deering (1978) padronizou os resultados do NDVI entre -1 e +1 através da razão da diferença entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e vermelho (RED) e a soma das mesmas bandas (ROSENDO, 2005):

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (1)$$

onde ρ_{NIR} é a reflectância na banda do infravermelho próximo; ρ_{RED} é a reflectância na banda do vermelho.

Conforme aumenta a cobertura florestal, aumenta a reflexão na banda do infravermelho próximo e reduz a reflexão na banda do vermelho, realçando a vegetação. Assim, os valores do NDVI variam de -1 a +1, sendo que quanto mais se aproxima de +1, mais saudável e bem desenvolvida é a vegetação (MELO et al., 2011).

De acordo com Rosendo (2005), este é o índice de vegetação mais utilizado em análises ambientais, e possui a capacidade de reduzir efeitos topográficos, sombras de nuvens, interferências atmosféricas e diferenças de iluminação. A utilização do NDVI permite determinar a vegetação fotossinteticamente ativa, sendo um índice bastante utilizado, também, para estimar a biomassa, a cobertura vegetal e para a observação de mudanças de uso e cobertura do solo (SHIMABUKURO et al., 1998).

Poelking et al. (2007) utilizaram o NDVI das imagens do satélite CBERS-2 a fim de analisar a dinâmica da vegetação em uma época de estiagem (2004-2005) e em uma época de chuvas normais (2005-2006) em uma região do Rio Grande do Sul. Em seu estudo, observou-se que os locais com maiores valores de NDVI são os locais com a presença de florestas, onde a cobertura do solo é maior e, por consequência, o solo é mais úmido, mesmo no período de estiagem. Em contrapartida, os locais com o valor de NDVI mais baixos ocorreram em locais de pastagens e agricultura, os quais têm menor resistência à deficiência hídrica.

Com a estiagem, os níveis de fotossíntese são reduzidos e a clorofila torna-se menos ativa, com menor absorção de radiação solar, gerando valores de NDVI mais baixos. Em períodos de ocorrência de chuva regular, os valores de NDVI aproximam-se de +1, mostrando a vegetação sadia e com altas taxas de fotossíntese (POELKING et al., 2007).

Para avaliar a influência da deficiência hídrica no vigor da vegetação em uma região de Botucatu (SP), Sartori et al. (2009) utilizaram duas imagens do satélite Landsat 5 para calcular o NDVI em épocas com diferentes índices pluviométricos. Para este satélite, as bandas utilizadas para o cálculo do NDVI foram as bandas 4 (infravermelho próximo) e 3 (vermelho).

Objetivando identificar o período chuvoso e de déficit hídrico na região de estudo, no trabalho de Sartori et al. (2009) foram analisados os dados pluviométricos de um período de 20 anos e, assim, foram selecionados os anos de 2000/2001 e 2004/2005. O período de chuvas regulares (2000-2001) apresentou índice pluviométrico anual de 1283,9 mm, enquanto o índice no período com deficiência de chuva (2004-2005) foi de 972,5 mm.

A partir das imagens de NDVI geradas para os anos de 2001 e 2005, os autores concluíram que os maiores valores do índice correspondiam aos locais com maior cobertura de solo por florestas, enquanto os menores valores ocorriam em locais de pastagens e agricultura intensiva, corroborando com os resultados obtidos por Poelking et al. (2007).

Sartori et al. (2009) observaram, ainda, que para analisar mudanças no uso do solo ocorridas no período em questão seria suficiente realizar uma operação de subtração entre as duas imagens de NDVI. Neste caso, os valores positivos demonstram aumento do valor de NDVI em 2005, enquanto valores negativos indicam redução do valor do índice. Locais que apresentam valores próximos de zero indicam que não ocorreram mudanças significativas na reflectância da paisagem.

3.3.2 EVI

Segundo Frampton et al. (2013), o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) foi proposto por Huete et al. (2002), combinando o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) com o Índice de Vegetação Resistente à Atmosfera (ARVI), com a finalidade de ajustar os valores de NDVI a partir da utilização de um fator de correção do solo e coeficientes para a correção dos efeitos atmosféricos para as bandas do vermelho e do azul, conforme demonstrado na equação abaixo.

$$EVI = 2,5 * \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + (C1 * \rho_{RED}) - (C2 * \rho_{BLUE}) + L)} \quad (2)$$

onde ρ_{NIR} é a reflectância da região do infravermelho próximo; ρ_{RED} é a reflectância da região do vermelho; ρ_{BLUE} é a reflectância da região do azul; C1 é o coeficiente de

correção dos efeitos atmosféricos para a banda do vermelho; C2 é o coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do azul; L é o fator de correção para interferência do solo. Os valores utilizados são $C1 = 6,0$; $C2 = 7,5$; $L = 1,0$.

O EVI auxilia na análise de alterações da sanidade da vegetação ocasionadas por eventos como a estiagem e na avaliação do vigor da cobertura vegetal, além de possuir mais sensibilidade em regiões que possuem alta densidade de biomassa. Como o NDVI, seus níveis variam de -1 a +1, com a vegetação mais saudável possuindo valores entre 0,2 e 0,8 (SOUSA JUNIOR et al., 2010).

Vibrans e Schramm (2009) utilizaram dados de EVI e NDVI para avaliar as consequências da estiagem na bacia hidrográfica do Rio Itajaí, em Santa Catarina. Para este trabalho, os dados do índice de vegetação de períodos chuvosos foram comparados com os dados de períodos de estiagem.

Os dados de precipitação foram obtidos no banco de dados do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas no período de 2000 a 2006 e, a partir deles, foi calculado o Índice de Estiagem para definir os períodos de estiagem. A metodologia utilizada por Vibrans e Schramm (2009) para estabelecer o período de estiagem foi a proposta por Castro (1996), que o define como período com precipitação mensal 40% menor do que a média histórica do mês. Foram identificados 9 meses de estiagem e 6 meses chuvosos.

Foram selecionadas 2 imagens de NDVI e EVI para cada um dos 15 meses e, em seguida, os autores fizeram a classificação para diferenciar áreas de agricultura e áreas de florestas na bacia hidrográfica.

Após o processamento dos dados de precipitação e cálculo do Índice de Estiagem, foi calculado o índice de correlação de Pearson para as imagens e mapas de precipitação e índices NDVI e EVI. Analisando-se os resultados da correlação de Pearson, pôde-se observar que nas regiões com cobertura florestal sempre verde e pouca variação de precipitação não foi verificada relação entre a precipitação e os índices de vegetação. Porém, em regiões com maiores variações de cobertura, como nas áreas de agricultura, existe relação entre as variáveis e percebeu-se que o EVI é mais sensível do que o NDVI para análise de alterações da cobertura. Vibrans e Schramm (2009) concluíram, portanto, que os índices de vegetação não poderiam ser utilizados para monitorar a estiagem na área da bacia hidrográfica do Rio Itajaí.

Com a finalidade de analisar como as variáveis meteorológicas influenciam o vigor vegetativo de cafeeiros na região do Alto Parnaíba, Minas Gerais, Volpato et al. (2009) utilizaram o EVI, a fim de desenvolver modelos de monitoramento de estiagem em locais de produção de café. Para este estudo, foram utilizadas informações da estação meteorológica automática de junho de 2006 a junho de 2008 para a área determinada. Foram utilizadas imagens do produto MODIS MOD13Q1 (resolução espacial de 250 m e resolução temporal de 16 dias) para o mesmo período (junho de 2006 a junho de 2008) para acompanhar as alterações do vigor vegetativo dos cafeeiros. Os dados das estações meteorológicas foram analisados no período de 16 dias, para coincidir com as imagens.

Observou-se que o EVI apresentou valores máximos de 0,78 (período chuvoso) e mínimos de 0,32 (período seco), sendo que os valores do índice aumentaram conforme as chuvas acumularam e diminuíram lentamente com o cessar das chuvas no período analisado. Ainda no estudo de Volpato et al. (2009, p. 04), percebeu-se que “chuvas maiores que 10 mm alteraram o valor do EVI, demonstrando recuperação do vigor vegetativo dos cafeeiros após período prolongado de estiagem”, ou seja, foi possível estimar a estiagem agrícola em cultivos de café através do índice em questão.

Objetivando verificar a relação entre a produção de soja e anomalias de estiagem na região central do Rio Grande do Sul, Pithan et al. (2017) utilizaram imagens EVI/MODIS dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro para gerar imagens de média e desvio padrão de referência e, a partir destes produtos, obtiveram imagens de anomalias de vegetação por meio do cálculo do Índice de Vegetação Padronizado (SVI) para o período dos anos de 2001 a 2016.

Os autores realizaram operações zonais, a fim de obter dados estatísticos simples como a média e, através da análise de correlação de Pearson, foi possível verificar que a estiagem resulta na redução dos valores de produção de soja. Em seu estudo, Pithan et al. (2017) concluíram que o mês mais crítico para a produção e que sofre maior interferência das anomalias é o mês de fevereiro. Segundo os autores, as imagens EVI permitem analisar o estresse hídrico das plantas, identificando variações na sanidade da vegetação e permitem, desta forma, obter informações atualizadas sobre o setor agrícola.

3.3.3 GNDVI

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada do Verde (GNDVI) foi proposto por Gitelson et al. (1996). Os autores dizem que este índice tende a apresentar maior sensibilidade para detectar diferentes níveis nutricionais do que o NDVI por utilizar a banda verde em seu cálculo e, portanto, é bastante utilizado para analisar a captação de água e nitrogênio. Ainda, o GNDVI possui maior sensibilidade para a detecção de concentração de clorofila do que os índices que utilizam a banda do vermelho. Castro e Abreu Júnior (2018) complementam dizendo que índices que utilizam a banda do verde podem ser utilizados para o mapeamento de vegetação em locais onde existam atividades decorrentes de ações humanas. O cálculo do GNDVI é feito a partir da equação abaixo:

$$GNDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{GREEN})}{(\rho_{NIR} + \rho_{GREEN})} \quad (3)$$

onde ρ_{NIR} é a reflectância da região do infravermelho próximo; ρ_{GREEN} é a reflectância da região do verde.

Mello et al. (2019) utilizaram os índices NDVI e GNDVI em uma região agrícola do estado de Goiás com a finalidade de comparar suas aplicações para a estimativa de biomassa vegetal. Foram utilizadas imagens do satélite CBERS-4 de três anos consecutivos.

A classificação da área foi realizada conforme valores dos índices utilizados, sendo distinguidas 3 classes: vermelha para indicar menor produção de biomassa, verde para indicar maior produção de biomassa e amarela para indicar produção intermediária. Ao final, os autores concluíram que o GNDVI apresentou maior sensibilidade para detectar a biomassa de dossel, por consequência do efeito de fundo atribuído ao solo.

Castro e Abreu Júnior (2018) utilizaram os índices NDVI, SAVI e GNDVI para analisar as alterações na cobertura vegetal da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Urucuia, em Minas Gerais, pelo período de 5 anos, entre 2013 e 2018. A partir das imagens do satélite Landsat 8 foram calculados os índices e foi realizada a classificação das áreas

em corpos d'água, solo exposto, vegetação intermediária e vegetação densa. Em seguida foi realizada uma operação de subtração entre os valores encontrados em 2018 e 2013, visando observar quais regiões sofreram alterações no período de estudo.

Quando comparado com os demais índices (SAVI e NDVI), o GNDVI apresentou aumento da cobertura por vegetação densa e intermediária, como consequência de a banda do verde destacar com mais exatidão e realismo as áreas de vegetação.

3.3.4 OSAVI

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Otimizado (OSAVI) foi proposto por Rondeaux et al. em 1996 e é uma modificação do SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo), o qual utiliza as bandas do infravermelho próximo e do vermelho. Além disso, este índice possui em sua equação um fator de ajuste de fundo de dossel que ajusta áreas com elevados níveis de reflectância, como é o caso de áreas com vegetação esparsa e alta reflectância do solo, e é indicado para a análise de cultivos agrícolas e áreas com vegetação de baixa densidade (Rondeaux et al., 1996 apud Camargo et al. 2007). O OSAVI é calculado através da seguinte equação:

$$OSAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0,16)} \quad (4)$$

onde ρ_{NIR} é a reflectância da região do infravermelho próximo; ρ_{RED} é a reflectância da região do vermelho; 0,16 é o fator de ajuste de fundo de dossel.

Fern et al. (2018) utilizaram o NDVI e o OSAVI para estimar e analisar a cobertura vegetal e as áreas de solo descoberto em uma região semiárida do sul do Texas (EUA) e comparar os dados obtidos através dos índices espectrais de vegetação com dados de levantamentos terrestres tradicionais. Os pesquisadores concluíram que o OSAVI é o índice mais adequado para a análise na cobertura vegetal em áreas semiáridas, pois as estimativas geradas para os diferentes tipos de cobertura do solo (solo descoberto, vegetação lenhosa e herbácea) não foram

significativamente diferentes das estimativas geradas por levantamentos terrestres, enquanto os valores produzidos pelo NDVI apresentaram maior disparidade.

Nakano et al. (2013) utilizaram sete índices espectrais de vegetação, entre eles o OSAVI e NDVI, para avaliar a relação entre os índices de vegetação e a quantidade de biomassa presente acima do solo em pastagens semiáridas na Mongólia. Os resultados da pesquisa mostraram que, entre os índices analisados, o NDVI e o OSAVI apresentaram melhores correlações com as variações temporais e espaciais de biomassa, sugerindo bom desempenho para indicar biomassa vegetal nas pastagens da região de estudo. Os autores concluíram, ainda, que o NDVI apresentou melhores resultados em relação ao OSAVI, neste caso, devido ao tipo de vegetação estudada, uma vez que os valores do NDVI poderiam sofrer interferência se houvesse a presença de florestas com copas fechadas e multicamadas.

3.4 MISSÃO SENTINEL

A série de satélites Sentinel começou a ser lançada em 2014 em missão conjunta entre a Agência Espacial Europeia (ESA) e a Comissão Europeia em atendimento ao Programa Copernicus, com o objetivo de substituir ou dar continuidade nas atividades de satélites mais antigos (EMBRAPA, 2020).

Cada missão possui um par de satélites que possui características adequadas para determinadas finalidades. Os satélites Sentinel – 1A e 1B são utilizados para o monitoramento oceânico e terrestre, e possuem sensores de radar acoplados. Os satélites Sentinel – 2A e 2B são utilizados para o monitoramento da vegetação e solos, e possuem sensores ópticos acoplados. Os satélites Sentinel – 3A e 3B são destinados à análise dos oceanos, estudos sobre a topografia da superfície do mar e temperatura da superfície do mar. Por fim, os satélites das missões Sentinel – 4 e Sentinel – 5 têm sua aplicação na análise e monitoramento da qualidade do ar (EMBRAPA, 2020).

Na tabela 1 são apresentadas as características de cada satélite da Missão Sentinel:

Tabela 1 – Características dos satélites da Missão Sentinel

MISSÃO SENTINEL							
SATÉLITE	1A	1B	2ª	2B	3A	3B	5P
LANÇAMENTO	03/04/2014	22/04/2016	23/06/2015	07/03/2017	16/02/2016	25/04/2018	13/10/2017
ALTITUDE	693 km	693 km	786 km	705 km	815 km	815 km	824 km
DURAÇÃO DA ÓRBITA	97,7 min	97,2 min	97,2 min	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
HORÁRIO DE PASSAGEM	6:00 PM	6:00 PM	10:30 AM	9:45 AM	10:00 AM	10:00 AM	1:30 PM
PERÍODO DE REVISITA	12 dias	12 dias	5 dias	5 dias	27 dias	27 dias	16 dias
TEMPO DE VIDA PROJETADO	12 anos	12 anos	12 anos	12 anos	7 anos	7 anos	7 anos
INSTRUMENTOS SENSORES	SAR	SAR	SAR e MSI	SAR e MSI	OLCI e SLSTR	OLCI e SLSTR	TROPOMI

Fonte: Embrapa, 2020 (adaptado).

Os satélites da missão Sentinel – 2 ficam alocados em órbita polar e possuem sensores multiespectrais MSI (Multi-Spectral Instrument) acoplados, os quais podem captar a reflectância em 13 bandas da região do visível, infravermelho próximo e médio. Sua resolução espacial varia entre 10, 20 e 60 metros, conforme a banda analisada (EMBRAPA, 2020).

Na tabela 2 pode-se observar as características das bandas geradas pelo sensor MSI:

Tabela 2 – Características das bandas do sensor MSI

RESOLUÇÃO	BANDA	NOME DA BANDA	COMPRIMENTO DE ONDA CENTRAL (nanômetro)
10 m	B02	Blue (azul)	490
	B03	Green (verde)	560
	B04	Red (vermelho)	665
	B08	NIR (infravermelho próximo)	842
20 m	B05	Red Edge 1	705
	B06	Red Edge 2	740
	B07	Red Edge 3	783
	B08A	Red Edge 4	865
	B11	SWIR 1	1610
	B12	SWIR 2	2190
60 m	B01	Aerossol	443
	B09	Water Vapor	940
	B10	Cirrus	1375

Fonte: Engesat, 20-- (adaptado).

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUBATÃO DO SUL

4.1.1 Localização e hidrografia

O estado de Santa Catarina está dividido em 10 Regiões Hidrográficas (figura 2), conforme Lei nº 10.949, de 9 de novembro de 1998, as quais possuem características naturais, sociais, econômicas e geográficas similares. A Região Hidrográfica 8 (RH 8), chamada de Litoral Centro, é integrante do sistema de drenagem da Vertente do Atlântico, a qual abrange cerca de 38% da área total do estado de Santa Catarina. Pertencem à RH 8 as bacias hidrográficas do Rio Tijucas, Rio Biguaçu, Rio Cubatão do Sul, Rio da Madre e bacias contíguas (SANTA CATARINA, 2016).

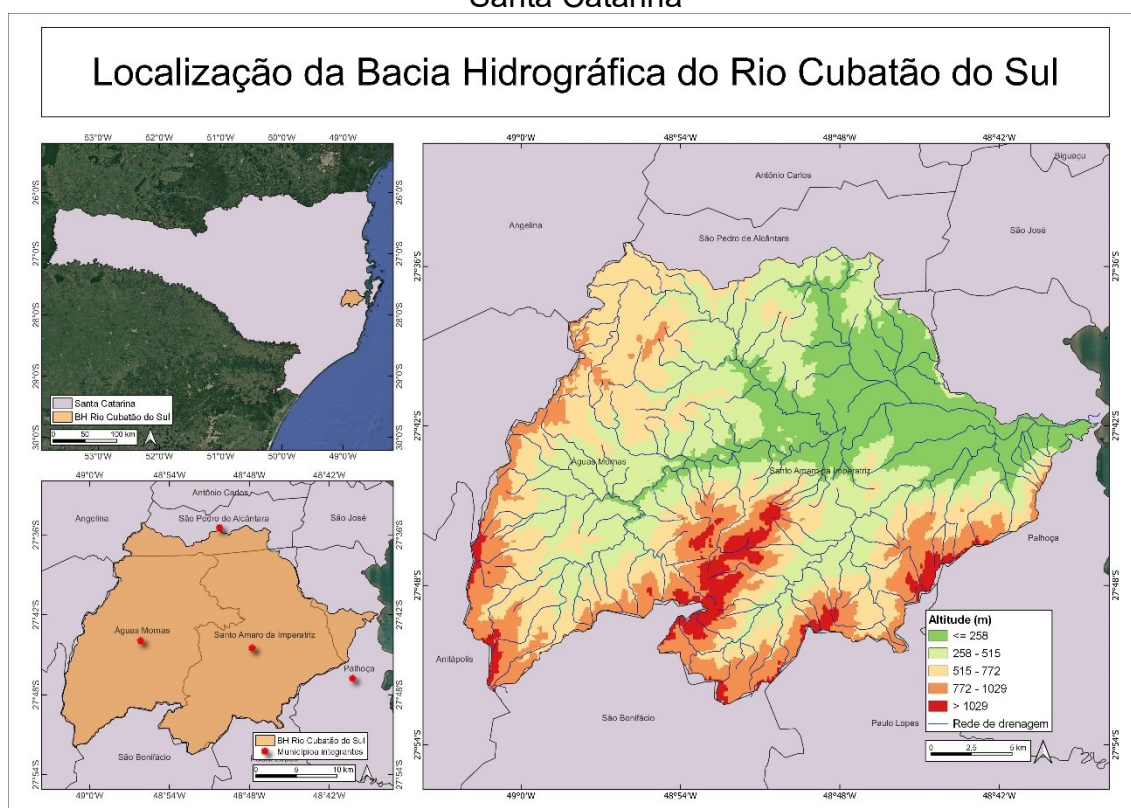
Figura 2 – Regiões hidrográficas de Santa Catarina



Fonte: Santa Catarina, 2016.

Com 738 km² de área de drenagem e ocupando cerca de 14% da área da RH 8, a Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul abrange os municípios de Santo Amaro da Imperatriz, Águas Mornas, parte de São Pedro de Alcântara e de Palhoça (figura 3), localizando-se entre as latitudes 27°35'46" e 27°52'50" sul e longitudes 48°38'24" e 49°02'24" oeste (PEREIRA; ZANIN, 2002; SOUZA et al., 2020; SDM-FEHIDRO, 2003).

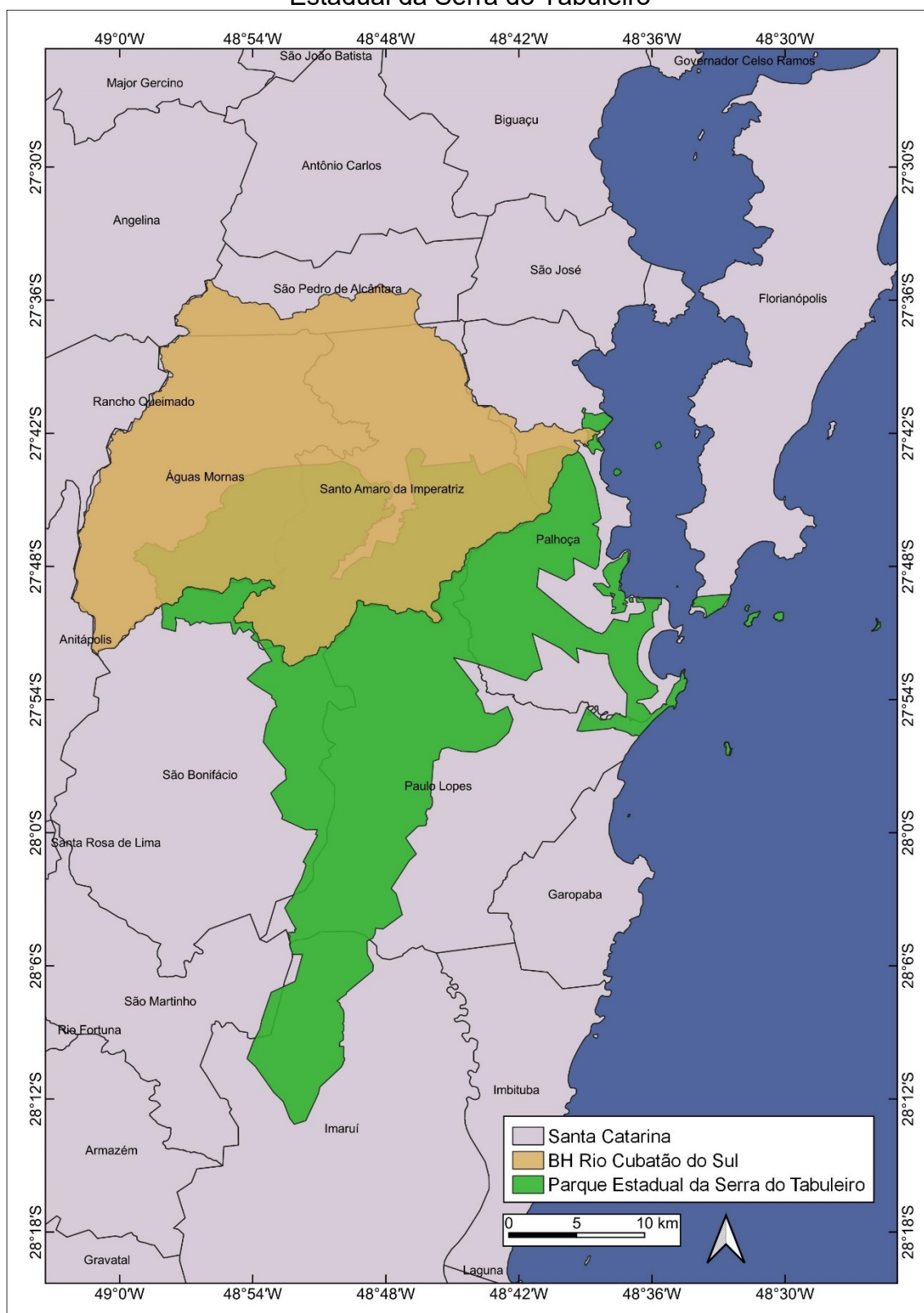
Figura 3 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul no estado de Santa Catarina



Fonte: Autoria própria, 2023.

Do total da área da bacia hidrográfica, 342 km² (46%) pertencem ao Parque Estadual da Serra do Tabuleiro (PAEST), como pode ser observado na figura 4. Este fator é de extrema importância para a preservação da diversidade ambiental da bacia e torna as ações em seu interior mais complexas e restritas (RAMOS, 2005).

Figura 4 – Área da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul pertencente ao Parque Estadual da Serra do Tabuleiro



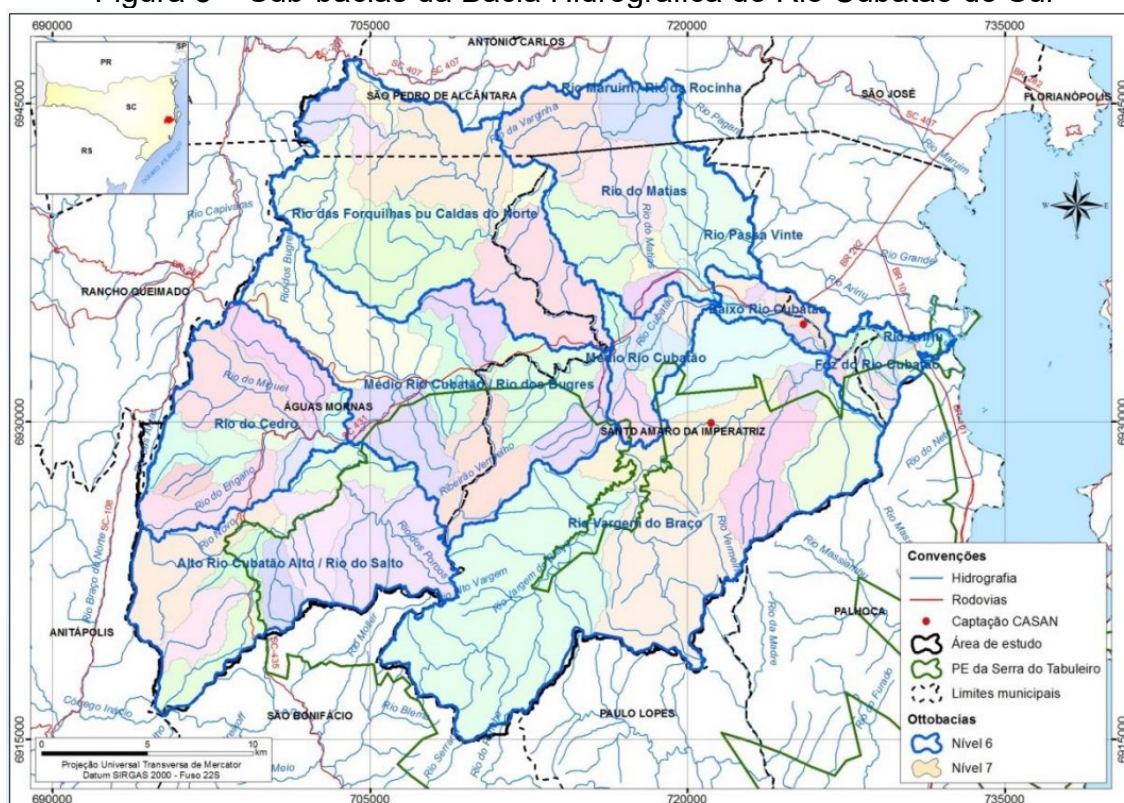
Fonte: Autoria própria, 2023.

Conforme Pereira e Zanin (2002), a Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão tem como afluentes que a compõe os rios dos Bugres, do Salto, dos Cedros, Forquilhas (Caldas do Norte), Matias, Ribeirão Vermelho, Águas Claras e Vargem do Braço. O Rio Cubatão do Sul, principal rio da bacia, com aproximadamente 65 km de extensão, é formado pela confluência dos Rios Cedro e Bugres no município de Águas Mornas.

O principal afluente da margem esquerda é o Rio Vargem do Braço, o qual drena o Parque Estadual da Serra do Tabuleiro e, juntamente com o Rio Cubatão do Sul, são os mananciais responsáveis pelo abastecimento de Biguaçu, Palhoça, Santo Amaro da Imperatriz, São José e parte de Florianópolis (SOUZA et al., 2020). Os principais afluentes da bacia (Bugres, Forquilhas, Matias, Ribeirão Vermelho, Águas Claras e Vargem do Braço) são drenados para o leste, desaguando no Rio Cubatão do Sul e deslocando-se para a Baía Sul, onde formam, em sua foz, o Manguezal da Palhoça (SCUPINO et al., 2019).

A Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul é formada por seis sub-bacias: Sub-bacia do Alto Cubatão (Rio do Salto); Sub-bacia do Rio do Cedro; Sub-bacia do Rio dos Bugres; Sub-bacia do Rio Vargem do Braço; Sub-bacia do Rio Caldas do Norte (Forquilhas) e Sub-bacia do Rio do Matias (RAMOS, 2005). Já Scupino et al. (2019) identificam a divisão em cinco sub-bacias, considerando a Sub-bacia do Alto Cubatão um conjunto dos segmentos da bacia do Rio Cubatão do Sul (alto, médio, baixo e foz), conforme figura 5.

Figura 5 – Sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul



Fonte: Scupino et al., 2019.

4.1.2 Clima e vegetação

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina (PERH/SC, 2017), a RH 8, onde a Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul está inserida, possui dois tipos de clima, os quais são classificados de acordo com Köppen em subtropical mesotérmico úmido com verões quentes (Cfa) e subtropical mesotérmico com verões amenos (Cfb).

O clima Cfa é caracterizado por temperaturas médias inferiores a 18° C no mês mais frio e superiores a 22° C no mês mais quente. Os verões são quentes e com maior concentração de chuvas e no inverno existem poucos registros de geadas. O clima Cfb possui verões mais frescos, com temperaturas médias abaixo de 22° C e, assim como o clima Cfa, não possui estação seca definida (PANDOLFO et al., 2002).

Os maiores níveis de precipitação da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul normalmente ocorrem em janeiro, fevereiro e março, enquanto os menores totais acontecem em maio e junho. No entanto, tem-se verificado distribuições anormais de

precipitação durante o ano, tendo como consequência épocas de estiagens atípicas na região (PEREIRA; ZANIN, 2002).

A Bacia Hidrográfica em questão apresenta cinco diferentes ecossistemas pertencentes ao bioma Mata Atlântica: manguezais e restingas (vegetação litorânea), floresta ombrófila densa, floresta ombrófila mista (araucárias), matinha nebulosa e campos de altitude (PEREIRA; ZANIN, 2002).

O Rio Cubatão, principal rio da bacia hidrográfica, desagua no município de Palhoça, onde forma o ecossistema de manguezal. A floresta ombrófila densa é encontrada em estágio secundário de regeneração nas encostas do curso médio e superior do rio e de seus afluentes. A floresta ombrófila mista, também chamada de floresta de araucárias, é encontrada nas partes altas das encostas. Por fim, nas partes mais altas do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro, como no Morro Cambirela, são encontradas matinhas nebulosas e campos de altitude (PEREIRA; ZANIN, 2002).

Segundo Scupino et al. (2019), grande parte da bacia hidrográfica encontra-se bem preservada, por consequência das áreas localizadas no interior do PAEST e manguezais. As áreas com menor nível de conservação encontram-se próximas ao litoral e em regiões mais baixas ao longo dos rios, onde a ocupação urbana provoca pressão sobre os ecossistemas costeiros.

A degradação ambiental da Bacia do Rio Cubatão do Sul teve início com a expansão da colonização da região, onde imigrantes, especialmente alemães, iniciaram processos de desmatamentos e queimadas para a implantação de pequenas propriedades agrícolas e vilas. Desde então, a bacia tem sofrido com problemas de poluição de água ocasionados por resíduos das atividades agropecuárias e pela expansão urbana, com grande aumento populacional (PEREIRA; ZANIN, 2002).

Pereira e Zanin (2002) constataram em expedição realizada nos rios da bacia hidrográfica que a maior parte da degradação ambiental na região é resultado da ação humana, especialmente ocasionada pela retirada da cobertura vegetal. Foram encontrados “impactos oriundos de desmatamentos, obras a beira-rio, fragmentação de propriedades, loteamentos, urbanização, poluição por esgotos e lixo, extrativismo mineral, pecuária e agricultura familiares (pequeno porte)” (PEREIRA; ZANIN, 2002).

4.2 PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO TABULEIRO

Considerado a maior unidade de conservação de Santa Catarina, o Parque Estadual da Serra do Tabuleiro (PAEST) foi criado em 1975 a partir de estudos dos cientistas Raulino Reitz e Roberto Miguel Klein sobre a flora catarinense e a preocupação com o aumento da exploração florestal. Na época de sua criação, o Parque abrangia sete municípios catarinenses, ocupando uma área de 90.000 ha. O objetivo dos biólogos era proteger os mananciais hídricos responsáveis pelo abastecimento dos municípios da região de Florianópolis, como as nascentes dos rios da Vargem do Braço, Cubatão, Madre e D'uma, e proteger a biodiversidade, considerando-se que, à exceção da floresta estacional decidual do Rio Uruguai, o parque abrange todas as fitofisionomias catarinenses (OLIVEIRA, 2005).

Atualmente o PAEST ocupa aproximadamente 84.130 ha, 1% do território catarinense, e está localizado entre as latitudes 27°41'09"S e 28°12'42"S e longitudes 48°49'20"O e 48°25'08"O, abrangendo parte dos municípios de Florianópolis, Palhoça, Paulo Lopes, Garopaba, Imaruí, São Martinho, São Bonifácio, Águas Mornas e Santo Amaro da Imperatriz, além das ilhas do Siriú, Cardos, Largo, Andrade e Coral, e os arquipélagos das três Irmãs e Moleques do Sul (PEREIRA et al., 2009; OLIVEIRA, 2005; IMA, 2019).

O PAEST, Unidade de Proteção Integral, faz parte do Mosaico de Unidades de Conservação da Serra do Tabuleiro e Terras de Massiambu, instituído pela Lei nº 14.661, de 26 de março de 2009. Fazem parte também do Mosaico as Áreas de Proteção Ambiental da Vargem do Braço, da Vargem do Cedro e do Entorno Costeiro do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro, as quais são classificadas como Unidades de Uso Sustentável.

O Instituto do Meio Ambiente (IMA, 2019) descreve sucintamente a localização de cada formação vegetal do Bioma Mata Atlântica no Parque Estadual da Serra do Tabuleiro da seguinte maneira:

No litoral, sob forte influência marítima, são encontradas as formações de restinga e manguezal. A floresta ombrófila densa, riquíssima em plantas epífitas, cobre as serras e ocupa a maior parte da área do Parque. Nas encostas superiores da serra, envolta em neblina formada pela condensação da umidade que chega do mar, aparece a matinha nebulosa. Nas partes mais

altas do Parque se faz presente a floresta ombrófila mista (floresta com araucárias) e os campos de altitudes. Cada ecossistema tem sua fauna e flora características, assim como suas espécies dominantes. As ilhas costeiras que fazem parte da unidade também apresentam suas singularidades. (Instituto do Meio Ambiente, 2019).

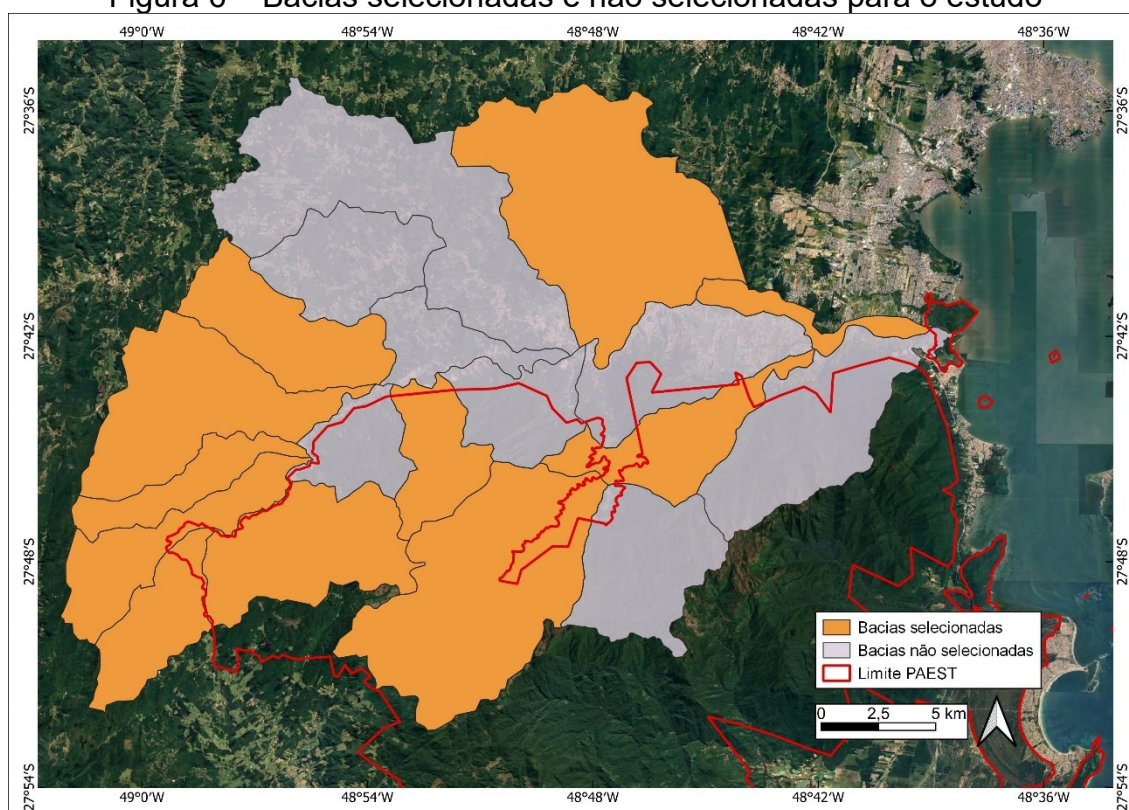
5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Foram selecionadas imagens do satélite Sentinel-2 na página de serviços online Earth Explorer, da instituição United States Geological Survey (USGS), para o período de dezembro de 2018 até julho de 2022. As imagens foram selecionadas conforme disponibilidade e qualidade, considerando-se que muitas delas apresentavam nuvens ou outros fatores que impossibilitariam sua utilização. O pré-processamento de cada imagem foi realizado com a ferramenta Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), software Quantum Gis (QGIS), versão 3.22.8, com a finalidade de fazer a correção atmosférica das imagens de satélite e conversão de nível de cinza para refletância no topo da atmosfera (TOA). Em seguida, foram calculados os índices NDVI, EVI, GNDVI e OSAVI, utilizando-se as bandas correspondentes de cada cena já corrigida.

Para a obtenção da imagem com a área total da bacia hidrográfica, foram realizados os downloads de duas cenas para cada data, objetivando a criação de mosaicos com cada índice. Após a criação dos mosaicos, as imagens foram reprojatadas para o Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000 (EPSG 4674) e foi criada uma máscara para extração da área correspondente às unidades hidrográficas de interesse, as quais estão localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul. As bacias selecionadas para este estudo podem ser visualizadas na figura 6, e correspondem a áreas que contemplam importantes rios da região, como os rios Vargem do Braço, Cubatão, Bugres e Matias. Pode-se observar que, para fins de comparação e análise das alterações da cobertura do solo, foram selecionadas bacias localizadas dentro e outras localizadas fora do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro.

Figura 6 – Bacias selecionadas e não selecionadas para o estudo



Fonte: A autoria própria, 2023.

A camada vetorial das bacias utilizada para esta etapa foi obtida no banco de dados da Epagri (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina) e contém a divisão hidrográfica do estado de Santa Catarina. Esta forma de divisão do estado em unidades hidrográficas foi realizada pela Epagri em cooperação com a Secretaria do Desenvolvimento Sustentável em 2007, considerando critérios hidrológicos que, quando comparados aos limites estabelecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), possuem maiores níveis de detalhamento (EPAGRI, 2007).

5.1.1 Influência do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro

Para a análise da influência do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro para a preservação e análise das alterações da cobertura florestal, foram utilizados mapas de cobertura e uso do solo do Projeto Mapbiomas. Após a aquisição dos arquivos matriciais e recorte das unidades hidrográficas de interesse, foi realizado o agrupamento das categorias a fim de diferenciar as classes de cobertura do solo, tendo como base os códigos de legendas para os valores de pixel na Coleção 7 do Mapbiomas. As classes foram definidas da seguinte maneira:

Classe 1: Floresta natural, a qual pode englobar as formações florestais, savânicas, mangues e restingas arborizadas;

Classe 2: Floresta plantada;

Classe 3: Formação natural não florestal, a qual pode englobar áreas pantanosas ou alagadas, formações campestres, apicuns, afloramentos rochosos e restingas herbáceas;

Classe 4: Agropecuária, englobando áreas de pastagem e agricultura;

Classe 5: Áreas não vegetadas, as quais podem possuir áreas urbanizadas e de mineração;

Classe 6: Corpos d'água, onde podem ser observados rios, lagos e áreas de aquicultura.

Foram analisados os mapas de usos do solo dos anos 1985, 1991, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 e 2021. Os mapas reclassificados foram recortados utilizando-se como camada de máscara o vetor do limite do PAEST. Inicialmente foi calculada a área total de cada classe e, em seguida, foi calculada a área das classes localizadas dentro do Parque. Desta forma, pode-se realizar um comparativo entre regiões que estão protegidas e as que não estão protegidas pelo PAEST.

A análise das alterações da cobertura florestal através da resposta espectral da vegetação foi feita com base na pesquisa de Melo et al. (2011), que utilizaram os dados de NDVI para analisar as alterações ocorridas em consequência da degradação ambiental em uma microbacia hidrográfica localizada em Cratêus, Ceará. Os autores utilizaram imagens de 1979 e 2006 para gerar o NDVI e, após sua reclassificação, formularam um Índice de Cobertura Vegetal, onde os valores de NDVI foram distribuídos de 1 (valores negativos) até 5 (valores positivos).

Na presente pesquisa, os valores de NDVI foram distribuídos em 11 classes, em que os valores negativos foram classificados como 1 e os valores positivos foram organizados em faixas com incrementos de 0,1, iniciando-se com a categoria 2 para os valores entre 0 e 0,1, e assim sucessivamente até a classe 11 para a faixa de NDVI entre 0,9 e 1,0. Após a classificação, utilizando-se a ferramenta Estatística Zonal, foi

possível calcular a quantidade de pixels em cada classe, possibilitando, desta forma, analisar as alterações ocorridas na área de estudo entre dezembro de 2018 e julho de 2022. Os pixels das classes 10 e 11 (valores de NDVI de 0,8 a 0,9 e 0,9 a 1,0) foram somadas para melhores resultados.

As classes de NDVI utilizadas podem ser observadas na tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Classes utilizadas para os intervalos de valores de NDVI

Classe	Intervalo dos Valores de NDVI
1	-1,0 a 0
2	0 a 0,1
3	0,1 a 0,2
4	0,2 a 0,3
5	0,3 a 0,4
6	0,4 a 0,5
7	0,5 a 0,6
8	0,6 a 0,7
9	0,7 a 0,8
10	0,8 a 0,9
11	0,9 a 1,0

Fonte: Autoria própria, 2023.

5.1.2 Análise da influência do regime hídrico

Para a análise do comportamento da cobertura florestal durante períodos de variabilidade hídrica a partir do uso de índices espectrais de vegetação, os dados estatísticos (desvio padrão, média e moda) dos índices NDVI, EVI, GNDVI e OSAVI, calculados a partir dos mapas gerados, foram comparados com dados de precipitação.

Na avaliação da influência do regime hídrico no comportamento espectral da vegetação, foram utilizados dados pluviométricos obtidos no Portal HidroWeb, ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas (SNIRH/ANA). A estação pluviométrica utilizada chama-se Poço Fundo, código 2748005, e fica localizada no município de Santo Amaro da Imperatriz, sendo operada pela EPAGRI.

5.1.3 Sensibilidade dos índices espectrais

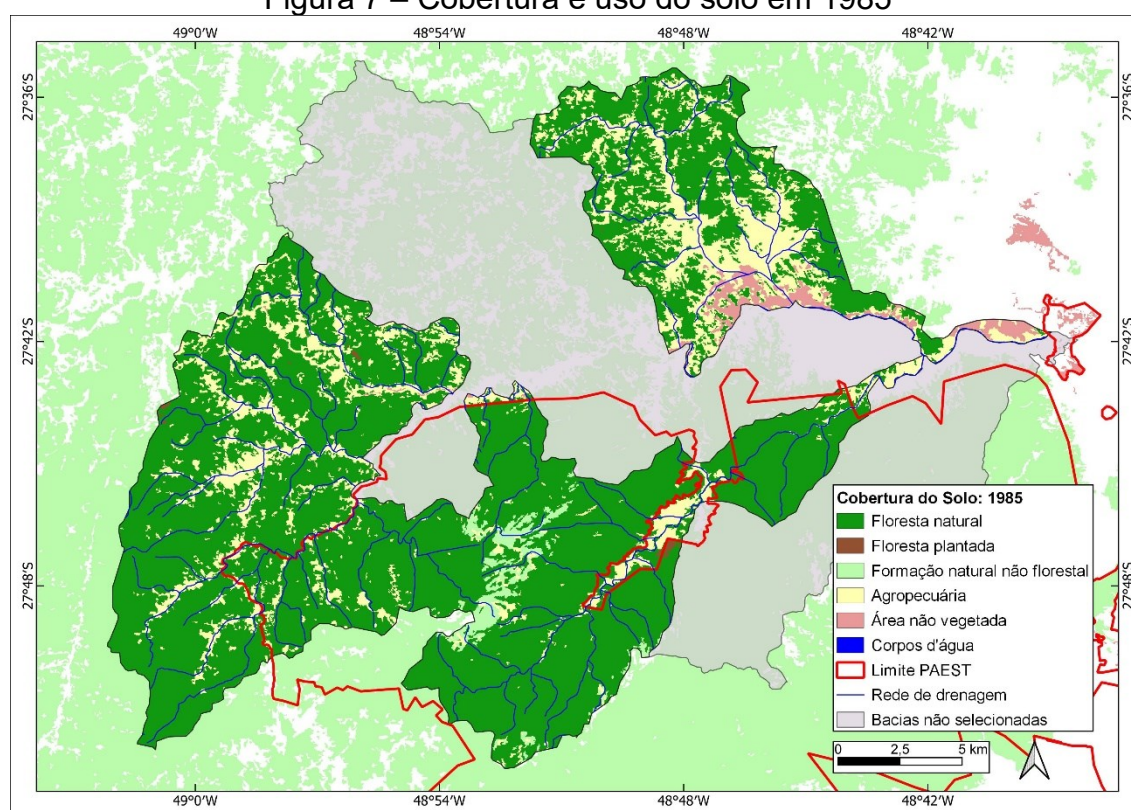
A análise da sensibilidade dos índices espectrais de vegetação foi realizada a partir da comparação dos gráficos de desvio padrão gerados para cada índice espectral (NDVI, EVI, GNDVI e OSAVI) com o gráfico de precipitação do período analisado e com a localização das unidades hidrográficas selecionadas (dentro ou fora do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro), através da discussão das respostas espectrais observadas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 COBERTURA E USO DO SOLO NAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS SELECIONADAS

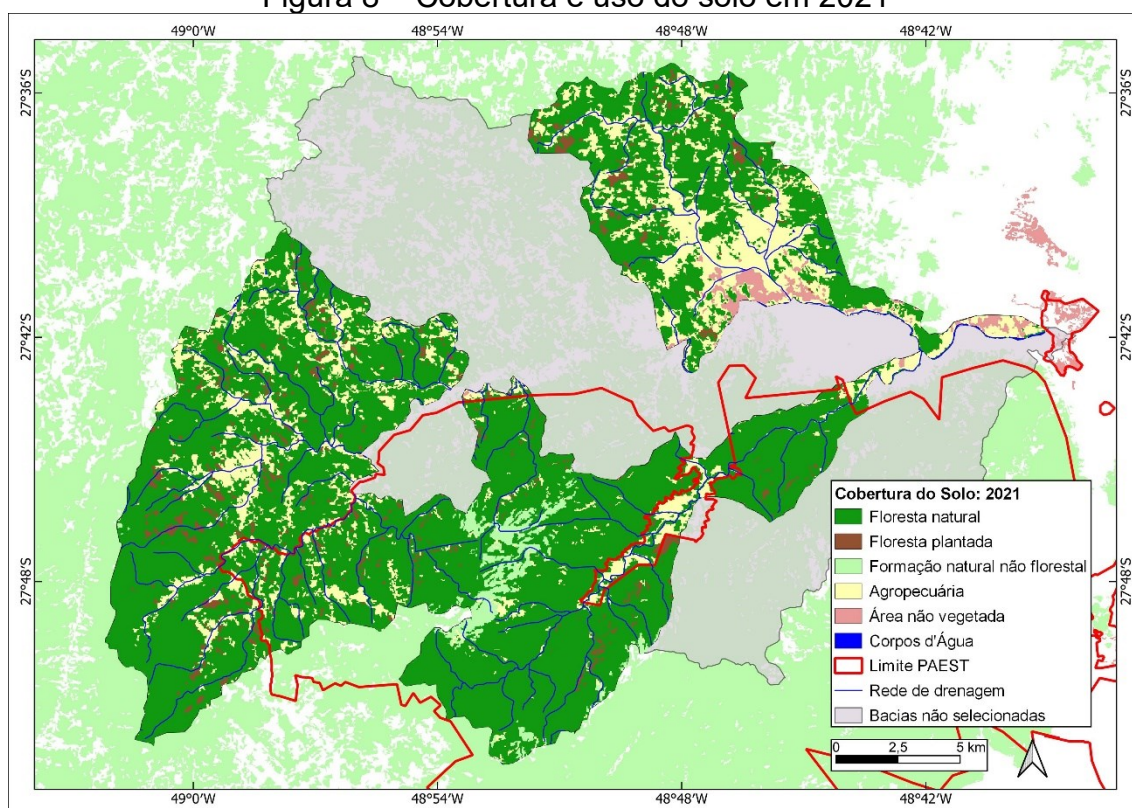
Analisando os mapas de usos de cobertura do solo da área de estudo de 1985 e 2021 (Figuras 7 e 8), pode-se observar que ocorreram alterações no período entre 1985 e 2021. Os mapas produzidos para os anos de 1991, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 podem ser observados no Anexo A. O gráfico da Figura 9 foi gerado a partir dos mapas de usos e cobertura do solo dos anos analisados entre 1985 e 2021, e apresenta a porcentagem de área de cada uma das classes, comparando cada classe localizada dentro e fora do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro.

Figura 7 – Cobertura e uso do solo em 1985



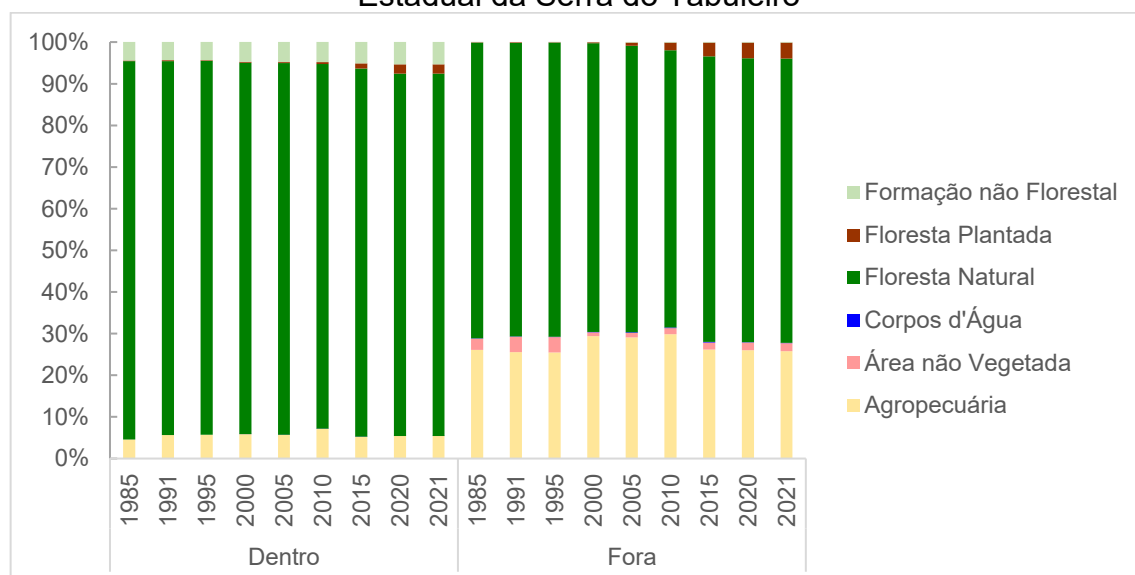
Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 8 – Cobertura e uso do solo em 2021



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 9 –Evolução do uso e cobertura do solo dentro e fora dos limites do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro



Fonte: Autoria própria, 2023.

As áreas com cobertura florestal natural, as quais são compostas por cobertura florestal nativa e vegetação litorânea (mangues e restingas), apresentaram uma redução de 3,2% de sua área total, cerca de 1378 ha. Quando comparamos a

redução dessa cobertura dentro e fora do PAEST, observa-se que ocorreu maior redução nas áreas localizadas dentro do Parque (3,91%) do que fora do Parque (redução de 2,77%). Embora o gráfico não demonstre uma redução tão significativa da cobertura florestal durante os anos analisados, é possível observar uma tendência e é importante salientar que ocorreu um período de grande desmatamento de florestas em estágio primário, as quais foram substituídas por vegetação em outros estágios de regeneração. De acordo com o Mapbiomas (2021), a substituição de vegetação em estágio primário por vegetação em recuperação acarreta redução da biodiversidade do ecossistema e altera a manutenção dos serviços ambientais que mantêm a qualidade do ar e o abastecimento de água e energia.

Segundo a Fundação SOS Mata Atlântica e o INPE (2021), Santa Catarina foi o quarto estado que mais desmatou a Mata Atlântica entre 2019 e 2020. No gráfico, pode-se observar que em 2020 a região de estudo apresentou uma das menores porcentagens de área de floresta natural (75,38%) no período analisado, ocorrendo uma área menor com esta classe de cobertura apenas no ano de 2010 (74,53%).

Em 2010 foi observado um aumento expressivo da área coberta por floresta plantada e maior porcentagem de área com cobertura por atividades agropecuárias nos anos analisados. Siminski e Fantini (2010), visando entender os motivos da redução de florestas remanescentes da Mata Atlântica em Santa Catarina, analisaram as justificativas para solicitação de supressão da vegetação submetidas ao Instituto do Meio Ambiente (IMA) entre 1995 e 2007. Foram analisados 1.753 pedidos, dos quais 71% foram apresentados por pessoas físicas. Um dos maiores motivos verificado pelos autores foi a supressão da vegetação para alteração do uso do solo devido ao baixo valor econômico e alta restrição de uso das terras com cobertura florestal nativa.

Segundo Siminski e Fantini (2010), a principal opção de uso de solo apresentada pelos proprietários, no caso de autorizadas as supressões da floresta nativa, seria a implantação de florestas homogêneas com espécies exóticas, fator que pode ser explicado pela criação do Programa Nacional de Florestas (PNF), através do Decreto nº 3.420, de abril de 2000. Em síntese, o PNF incentivou os pequenos e médios produtores rurais a implantarem e manterem florestas plantadas, fator que pode justificar o aumento considerável da área coberta por floresta plantada a partir do ano 2000.

Conforme o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina (2017), cerca de 88% da área total da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul encontra-se antropizada, considerando-se áreas com pastagem, usos agrícolas, reflorestamentos com espécies florestais exóticas e outros usos relacionados à atividade humana. Observa-se na área de estudo da presente pesquisa que as áreas com florestas naturais permanecem predominantes e preservadas, embora seja possível perceber o aumento das atividades antrópicas através do crescimento de áreas de cultivo e pastos (indicado pela agropecuária no gráfico e nos mapas) e reflorestamento com espécies exóticas (floresta plantada), assim como aumento das áreas não vegetadas, as quais representam áreas de urbanização e mineração. Apesar do elevado grau de urbanização na Bacia Hidrográfica, a agricultura e a pecuária da região têm grande importância, e as áreas destinadas a essas atividades representam de 17 a 22% do total da área de estudo nos períodos analisados.

Com relação às áreas não vegetadas fora do limite do Parque, pode-se notar um aumento entre 1985 e 1995 e um decréscimo na porcentagem de área entre 1995 e 2000, porém, a partir de 2000 a área não vegetada volta a aumentar. Isto pode ser explicado por alterações dos códigos de usos do solo do projeto Mapbiomas, uma vez que a tendência é que os índices de urbanização tenham aumentado com o passar dos anos nas áreas não protegidas. Segundo o Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Cubatão, Madre e Bacias Contíguas (PRH-CMC, 2018), os municípios da Grande Florianópolis começaram um processo de desenvolvimento da urbanização a partir da construção da BR-101 e BR-282 em 1970 e, especialmente a partir de 1990, a população rural começou a diminuir, enquanto a população em regiões urbanas apresentou crescimento. De acordo com o PRH-CMC, os municípios da região da Grande Florianópolis apresentaram crescimento demográfico maior do que a média no restante do estado.

Quando a cobertura do solo da área localizada dentro do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro é comparada com a área de estudo localizada fora do Parque, pode-se observar que, no período entre 1985 e 2021, ocorreu maior redução de floresta natural na região protegida pelo PAEST do que na área não protegida. Ainda, observa-se que dentro dos limites da unidade de proteção ocorreu aumento de 0,88% de áreas ocupadas por pastagem e agricultura, enquanto fora do PAEST constatou-se redução de 0,26% desta classe de uso do solo.

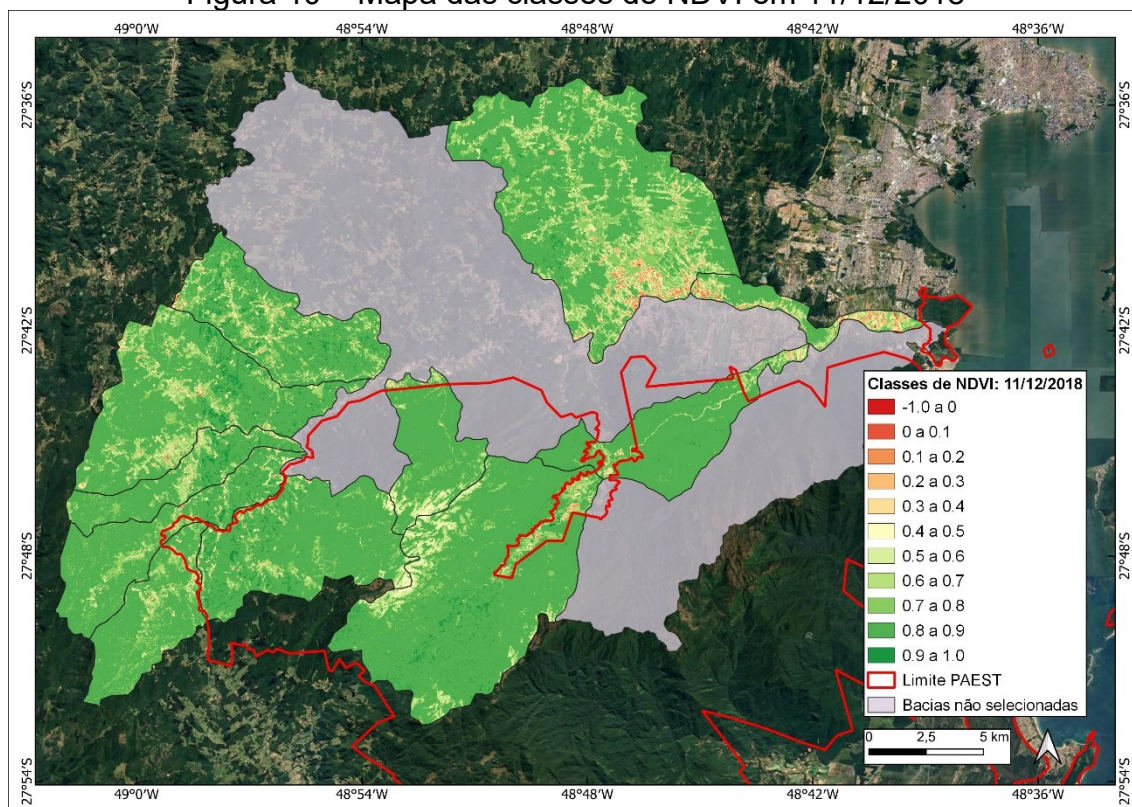
O aumento da área de agropecuária (agricultura e pastagem) no interior do Parque é bastante discutível, uma vez que desde a sua criação em 1975 ele é considerado uma unidade de proteção integral, o que significa que é proibida a habitação de humanos em seu interior e que é admitida apenas a utilização indireta de seus recursos naturais, ou seja, são expressamente proibidas as atividades que explorem, mesmo que de forma sustentável, seus recursos naturais ou outras formas econômicas, tendo em vista que seu principal objetivo é a preservação do ecossistema.

O incremento de áreas destinadas à agricultura, pecuária e florestas exóticas em locais de preservação como o Parque Estadual da Serra do Tabuleiro pode ter relação com a ausência de fiscalização e controle de atividades ilegais e a pressão de agricultores que não aceitaram a conversão de áreas que poderiam ser utilizadas para atividades econômicas em locais de preservação integral.

Para complementar a análise da alteração da cobertura do solo com a utilização de índice espectral de vegetação, foram gerados mapas identificando as localizações de cada classe a partir da classificação dos níveis de NDVI na área de estudo. Nas Figuras 10 e 11 abaixo, pode-se observar os mapas com as classes de NDVI em 11/12/2018 e 28/07/2022 e, por consequência, as alterações da resposta espectral da vegetação ocorridas no período analisado.

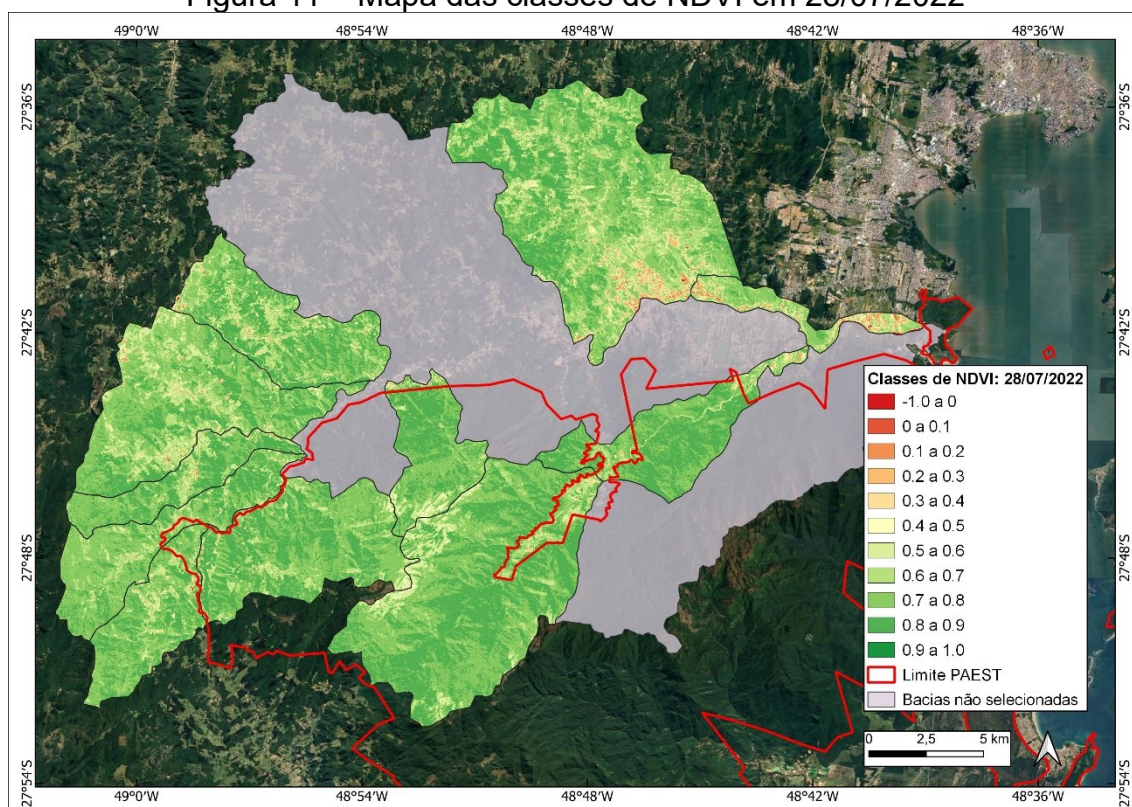
De acordo com Huang et al. (2021), os valores de NDVI negativos, próximos de -1, indicam corpos d'água, valores próximos de zero indicam rochas, areias, superfícies de concreto e valores positivos são indicadores de vegetação, como plantações, arbustos, gramíneas e florestas. Quanto mais próximos de +1 estiverem os valores de NDVI, maior será a ocorrência de vegetação saudável, vigorosa, úmida e bem desenvolvida.

Figura 10 – Mapa das classes de NDVI em 11/12/2018



Fonte: Autoria própria, 2023.

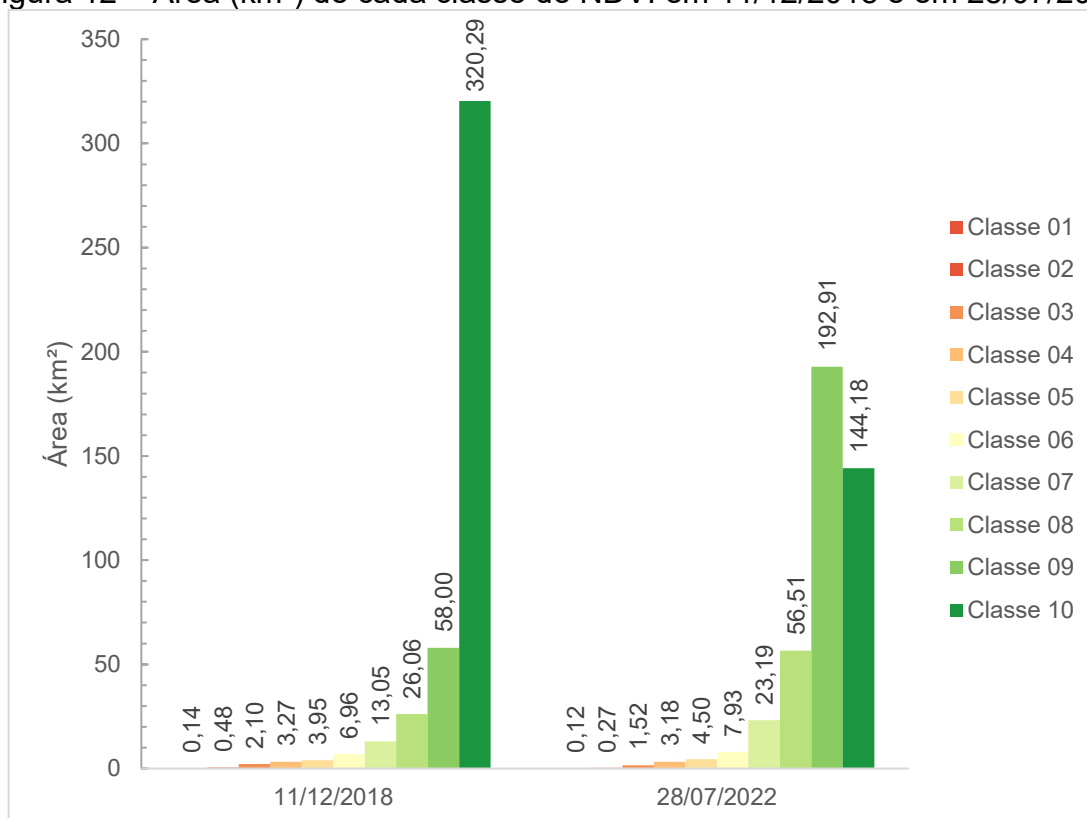
Figura 11 – Mapa das classes de NDVI em 28/07/2022



Fonte: Autoria própria, 2023.

Para melhor visualização das alterações ocorridas, foram gerados os gráficos abaixo (Figura 12), os quais representam a área em km² de cada classe em 11/12/2018 e em 28/07/2022.

Figura 12 – Área (km²) de cada classe de NDVI em 11/12/2018 e em 28/07/2022



Fonte: Autoria própria, 2023.

Observa-se que tanto as classes mais baixas do NDVI quanto as mais altas, se somadas, não apresentaram grandes alterações, permanecendo razoavelmente constantes, ou seja, neste caso o NDVI não representa as mudanças ocorridas ao longo do tempo, como avanço da urbanização e redução da cobertura florestal.

Foram também produzidos mapas com as localizações das classes dos índices EVI, GNDVI e OSAVI para as datas 11/12/2018 e 28/07/2022 (Anexo B), porém estes não apresentaram resultados satisfatórios para a análise do uso do solo nessa situação. Percebe-se que, principalmente nos casos do EVI e do OSAVI, as classes mais representativas estão entre a 06 e a 07, mesmo em locais onde há grande presença de florestas, as quais estariam, provavelmente, enquadradas nas classes 09 e 10. No caso do GNDVI, observa-se valores do índice mais elevados, o que mostra maior coerência com a cobertura do solo das áreas analisadas. Ainda

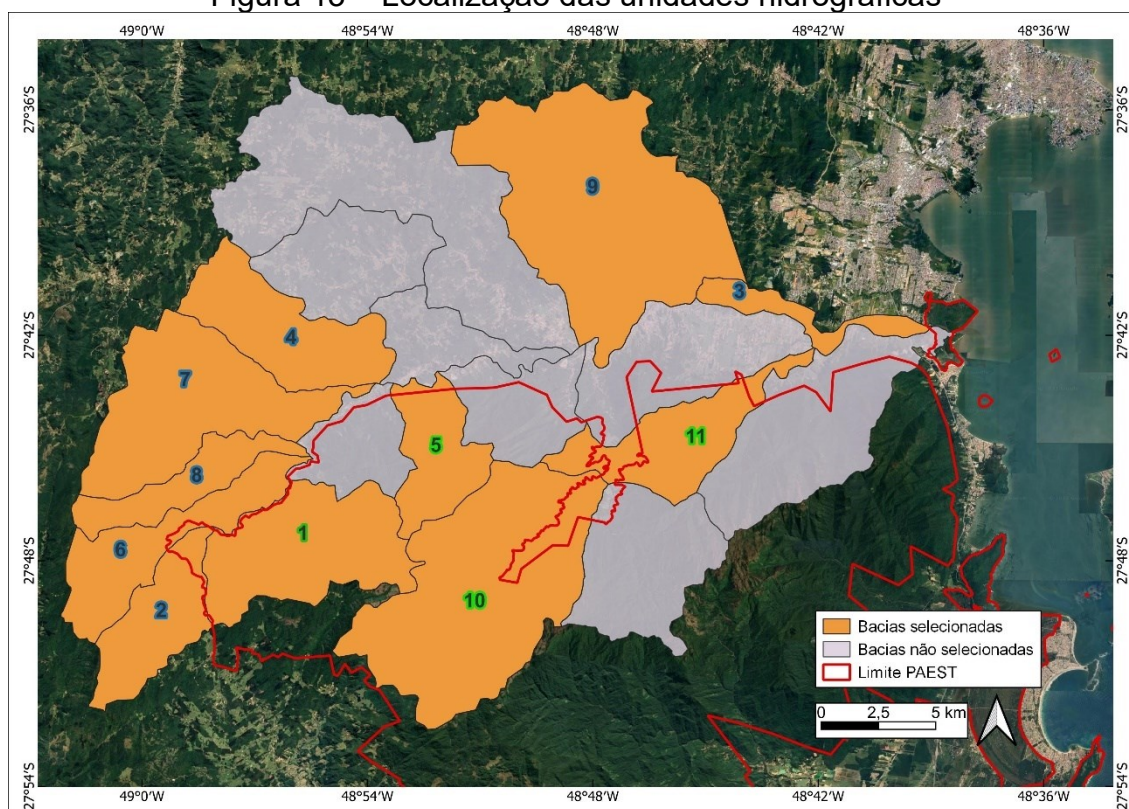
assim, a reclassificação dos índices EVI, GNDVI e OSAVI apresentou alguns erros, resultando em extrapolação dos valores, os quais muitas vezes ficaram além dos limites que vão de -1 até +1.

6.2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO E A VARIABILIDADE HÍDRICA

O estudo da relação entre o comportamento espectral da vegetação e a variabilidade hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul foi realizado a partir da análise do desvio padrão dos índices espectrais em cada unidade hidrográfica da área de estudo, objetivando identificar as regiões com maiores diferenças de valores e comparando-os com valores da precipitação mensal e média na região.

Para melhor compreensão, pode-se observar a localização e identificação de cada região analisada na Figura 13. Os números “1”, “5”, “10” e “11” indicam as bacias dentro do PAEST, enquanto os demais indicam as regiões localizadas fora da área de preservação.

Figura 13 – Localização das unidades hidrográficas

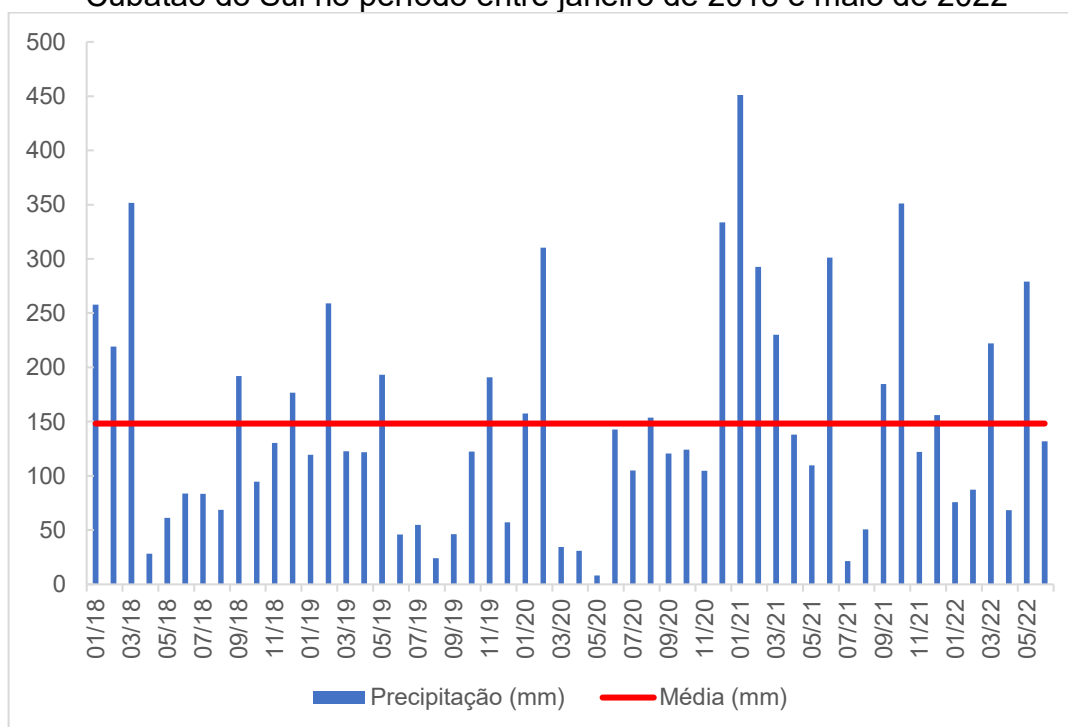


Fonte: Autoria própria, 2023.

Reverendo os mapas das Figuras 10 e 11 e os gráficos relacionados na Figura 12, é perceptível a alteração da área de cada classe de NDVI no período analisado na área de estudo. Pode-se associar essa mudança da área das classes à época das imagens utilizadas, visto que a primeira foi obtida no mês de dezembro de 2018, época do ano que geralmente ocorrem maiores totais pluviométricos do que o mês de julho, quando a segunda imagem foi obtida.

A Figura 14 mostra o gráfico da precipitação mensal na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul entre janeiro de 2018 e maio de 2022 e a média da precipitação no mesmo período para melhor observação dos meses com maiores e menores ocorrências pluviométricas. Fica evidente que durante o período das imagens, os meses entre abril e agosto possuem menores incidências de chuva, enquanto entre setembro e março ocorrem os maiores picos pluviométricos, demonstrando certa relação entre o NDVI e a precipitação.

Figura 14 – Precipitação mensal e precipitação média na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul no período entre janeiro de 2018 e maio de 2022



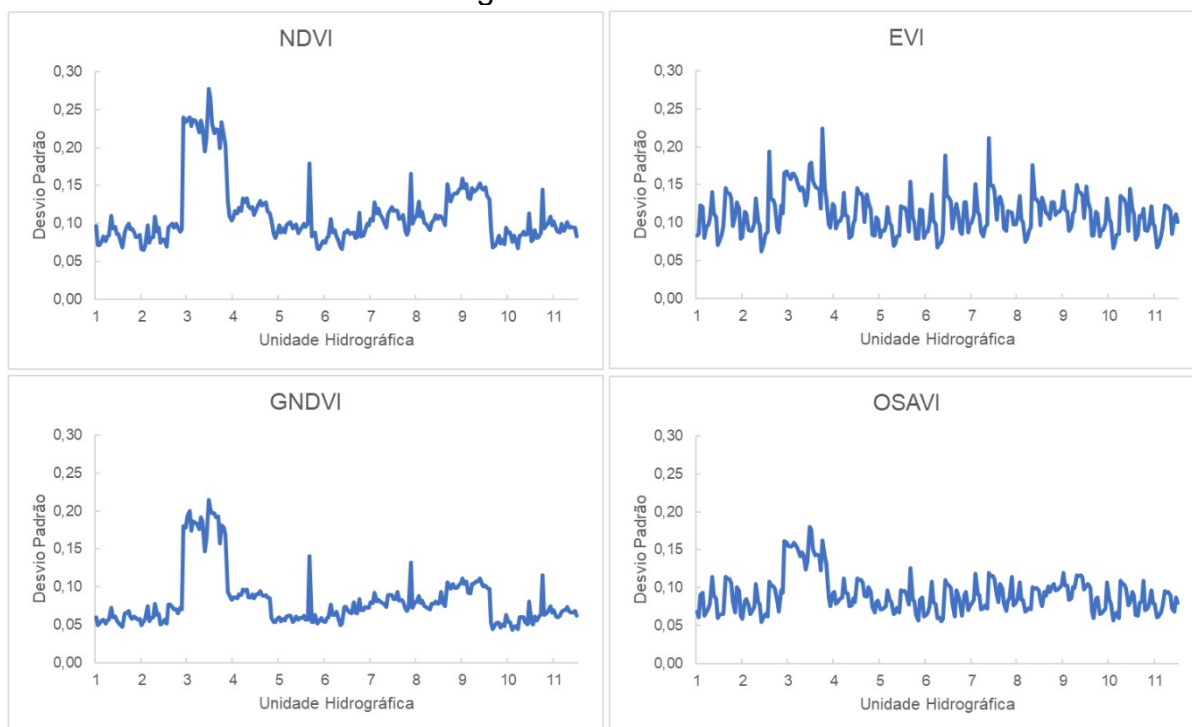
Fonte: Autoria própria, 2023.

Nos meses de janeiro a março dos anos 2018, 2019, 2020 e 2021 os níveis de precipitação são maiores do que nos meses entre abril e agosto, estando, muitas vezes, acima da média para a época e validando a afirmação de Pereira e Zanin

(2002) de que a maior precipitação na região ocorre nos meses mais quentes, enquanto nos meses de temperaturas mais baixas a precipitação fica reduzida para níveis bem abaixo da média. No ano de 2022 observa-se uma tendência à alteração desse padrão, ocorrendo menores níveis de precipitação nos meses de janeiro e fevereiro do que nos meses de maio e junho.

Os gráficos da Figura 15 apresentam o desvio padrão dos índices espectrais de vegetação analisados na totalidade da região de estudo no período entre 11 de dezembro de 2018 e 28 de julho de 2022, e permitem avaliar as regiões que apresentam maiores disparidades nos valores dos índices na época analisada. Os números de 1 a 11 no eixo horizontal representam cada uma das bacias selecionadas para esta pesquisa.

Figura 15 – Gráficos de desvio padrão dos índices espectrais na região de estudo da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul

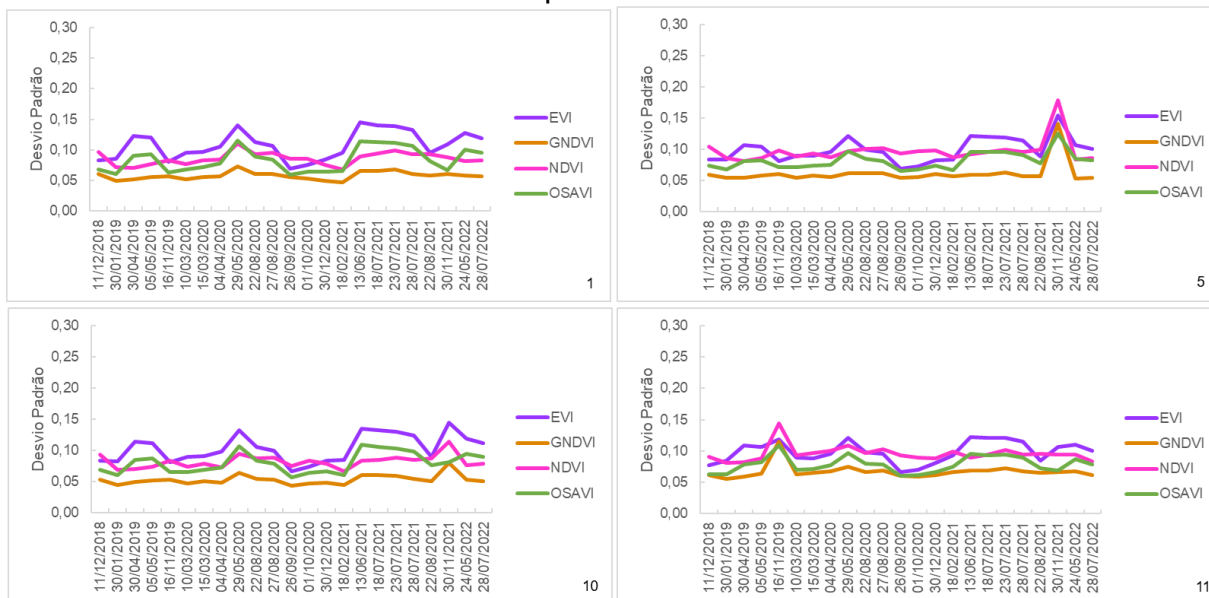


Fonte: Autoria própria, 2023.

Observa-se que ocorre aumento do desvio padrão de forma mais acentuada especialmente na sub-bacia “3” nos índices NDVI e GNDVI, o que indica menor homogeneidade entre os valores dos índices. Complementando, os gráficos abaixo detalham a variação do desvio padrão em cada unidade hidrográfica no tempo,

separando-se as regiões que se encontram dentro (Figura 16) e fora (Figura 17) do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro.

Figura 16 – Desvio padrão dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas dentro do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 17 – Desvio padrão dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas fora do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro



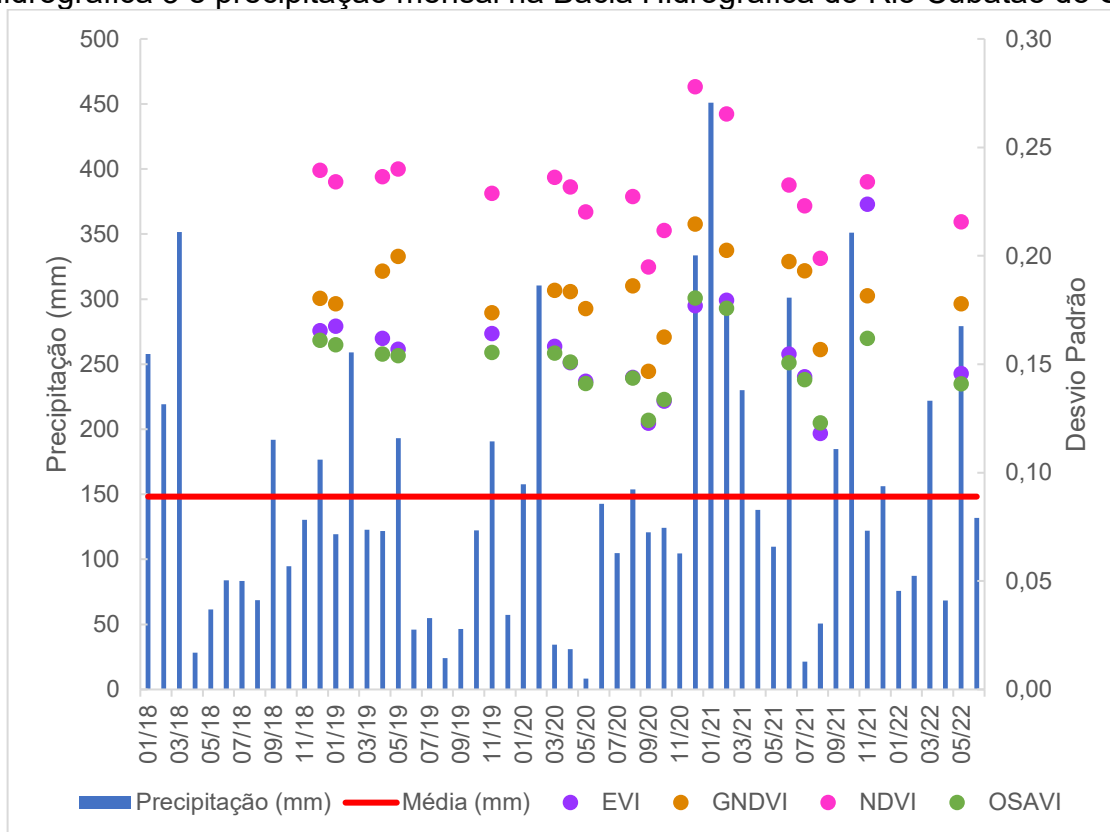
Fonte: Autoria própria, 2023.

A unidade hidrográfica “3”, apresentada nos gráficos da Figura 15 e detalhada no gráfico da Figura 17, está localizada totalmente fora dos limites do PAEST. Retornando à Figura 9, a qual mostra o uso do solo das bacias selecionadas em 2021, observamos que esta região possui poucas áreas de florestas naturais e grandes áreas não vegetadas, como perímetros urbanos e áreas destinadas à agropecuária. Nota-se que esta área apresenta valores de desvio padrão mais elevados, ou seja, ocorre menor uniformidade dos valores dos índices espectrais.

Unindo as informações do gráfico da bacia “3” (Figura 17) com o gráfico da precipitação (Figura 14), tem-se a Figura 18, em que se observa que os desvios

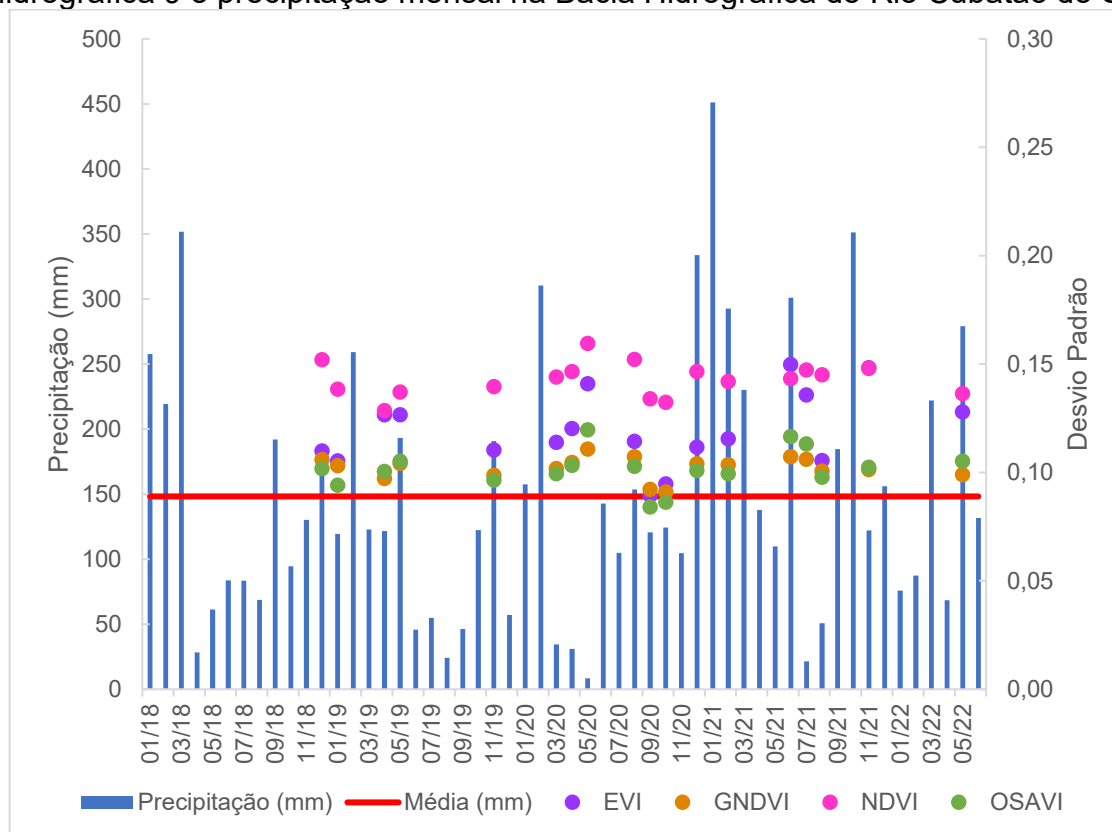
padrões do NDVI, GNDVI e OSAVI parecem acompanhar os níveis de precipitação na região, aumentando com a maior ocorrência de chuvas e reduzindo quando a pluviosidade diminui. O desvio padrão do EVI, no entanto, não necessariamente responde aos níveis de precipitação da mesma forma que os demais índices.

Figura 18 – Desvio padrão dos índices espectrais de vegetação da unidade hidrográfica 3 e precipitação mensal na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul



A unidade hidrográfica identificada como “9”, também localizada fora dos limites do Parque, apresentou os valores de desvio padrão mais constantes e baixos do que a bacia “3” e, portanto, menor variação dos valores dos índices espectrais de vegetação. Apesar de não estar em área protegida, esta região possui grande parte de sua cobertura com floresta natural, o que pode explicar a menor alteração dos valores de índices. Quando confrontados com o gráfico de precipitação (Figura 19), o gráfico de desvio padrão dessa região não apresenta grandes alterações nos períodos mais chuvosos, o que pode indicar maior relação dos valores dos índices espectrais com a cobertura do solo do que com os níveis da precipitação.

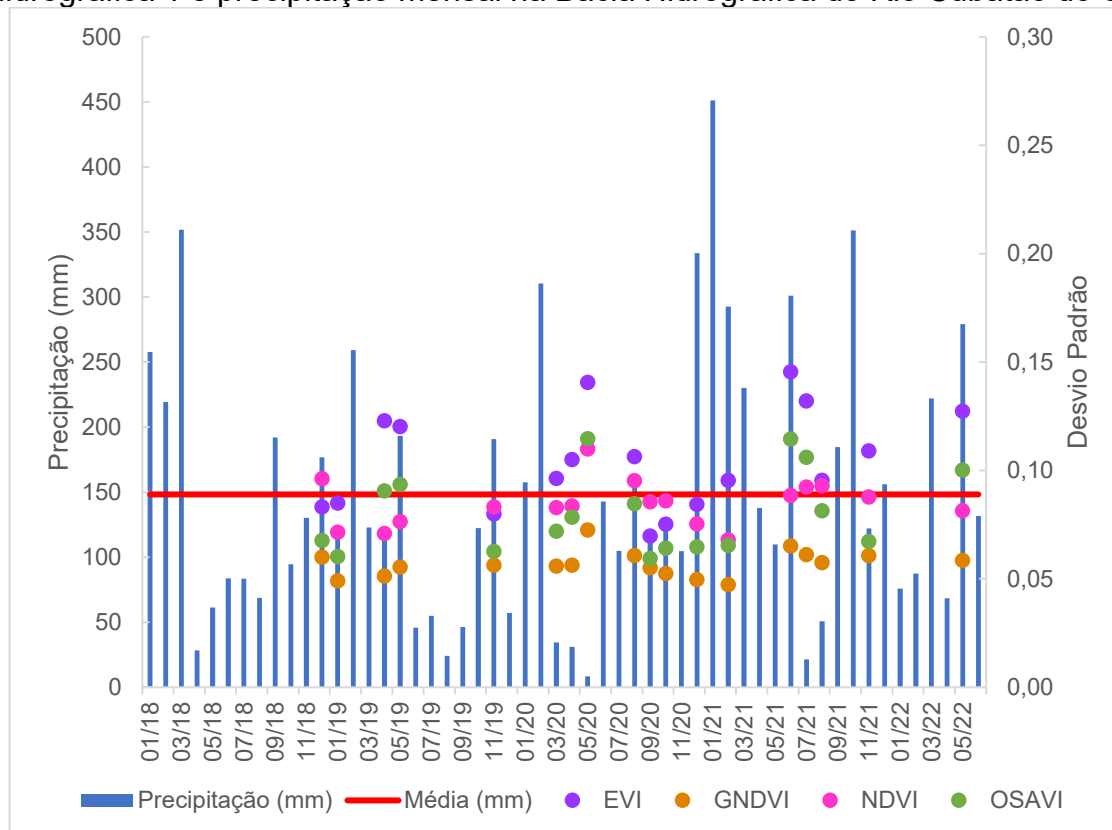
Figura 19 – Desvio padrão dos índices espectrais de vegetação da unidade hidrográfica 9 e precipitação mensal na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul



Fonte: Autoria própria, 2023.

Com relação às unidades hidrográficas localizadas dentro do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro (Figura 16), é possível observar que os valores de desvio padrão são consideravelmente menores, mostrando maior similaridade entre os índices espectrais para as regiões analisadas no tempo. Unindo as informações da precipitação e do desvio padrão da unidade hidrográfica “1”, a qual encontra-se integralmente protegida pelo PAEST, tem-se a figura 20.

Figura 20 – Desvio padrão dos índices espectrais de vegetação da unidade hidrográfica 1 e precipitação mensal na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul



Fonte: Autoria própria, 2023.

Percebe-se que as alterações do desvio padrão na bacia selecionada não acompanham necessariamente as variações na precipitação; quando ocorre redução da precipitação, como de dezembro de 2018 para janeiro de 2019, pode-se observar a redução do desvio padrão dos índices espectrais. Porém, quando ocorre aumento da pluviosidade, como de outubro para dezembro de 2020, podemos notar que o desvio padrão do GNDVI e do NDVI diminuiu, enquanto o desvio padrão dos demais índices teve um aumento. Da mesma forma, percebe-se que muitas vezes o desvio padrão dos índices mantêm valores similares em meses com níveis de chuvas próximos da média e em épocas consideradas de estiagem, com médias pluviométricas abaixo dos 50 mm de precipitação.

Depreende-se da análise dos gráficos que, embora ocorra variação dos índices espectrais nas bacias com maior cobertura florestal e localizadas na área de proteção integral, esta variação é menor do que nas bacias que não estão protegidas pelo PAEST e que, por consequência, possuem menor cobertura florestal. Neste caso, conclui-se que a cobertura e o uso do solo possuem maior influência nas alterações dos índices espectrais de vegetação e que a precipitação atua de forma indireta, uma

vez que a presença de florestas pode interferir na manutenção da umidade do solo mesmo em épocas de estresse hídrico (SARTORI et al., 2009).

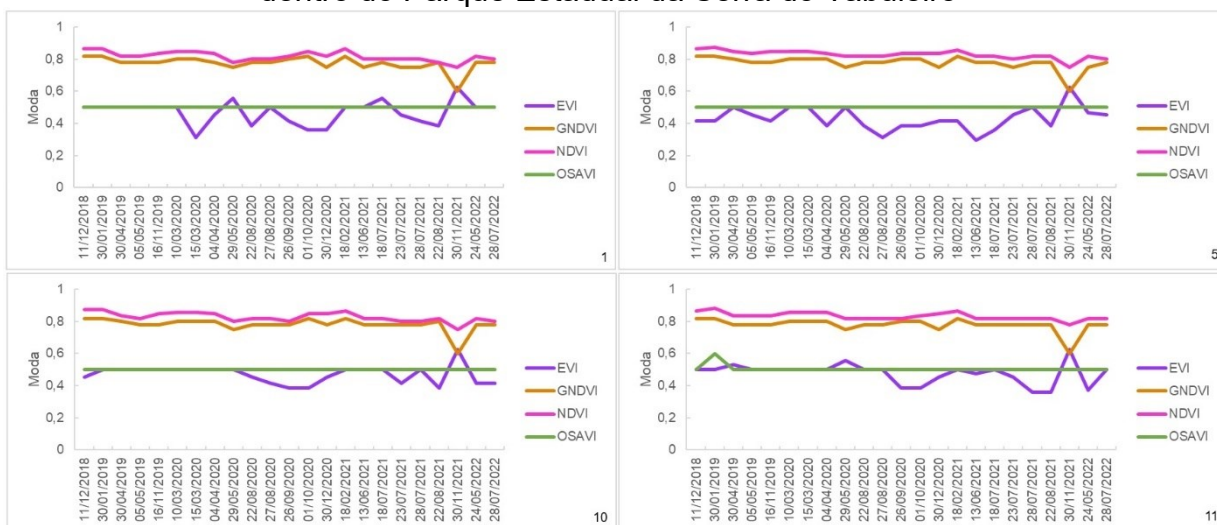
É importante salientar que os períodos analisados são curtos e a vegetação ainda possui recursos hídricos para seus processos fisiológicos. De acordo com Rosa et al. (2013), somente um período mais prolongado de seca poderia ocasionar deficiência hídrica na vegetação de forma a interferir em sua resposta espectral.

6.3 SENSIBILIDADE DOS ÍNDICES ESPECTRAIS DE VEGETAÇÃO

Pode-se observar a moda (valores de índices espectrais que ocorreram com maior frequência) nas unidades hidrográficas localizadas dentro e fora do PAEST nas Figuras 21 e 22 abaixo. Percebe-se que dentro do Parque o índice com maiores variações da moda é o EVI, o qual apresenta o valor mais elevado e frequente em 30/11/2021, período em que a precipitação esteve abaixo da média. Com relação aos demais índices, apresentaram valores com poucas alterações, sendo que o OSAVI permaneceu inalterado, e o GNDVI apresentou redução mais acentuada da moda em 30/11/2021.

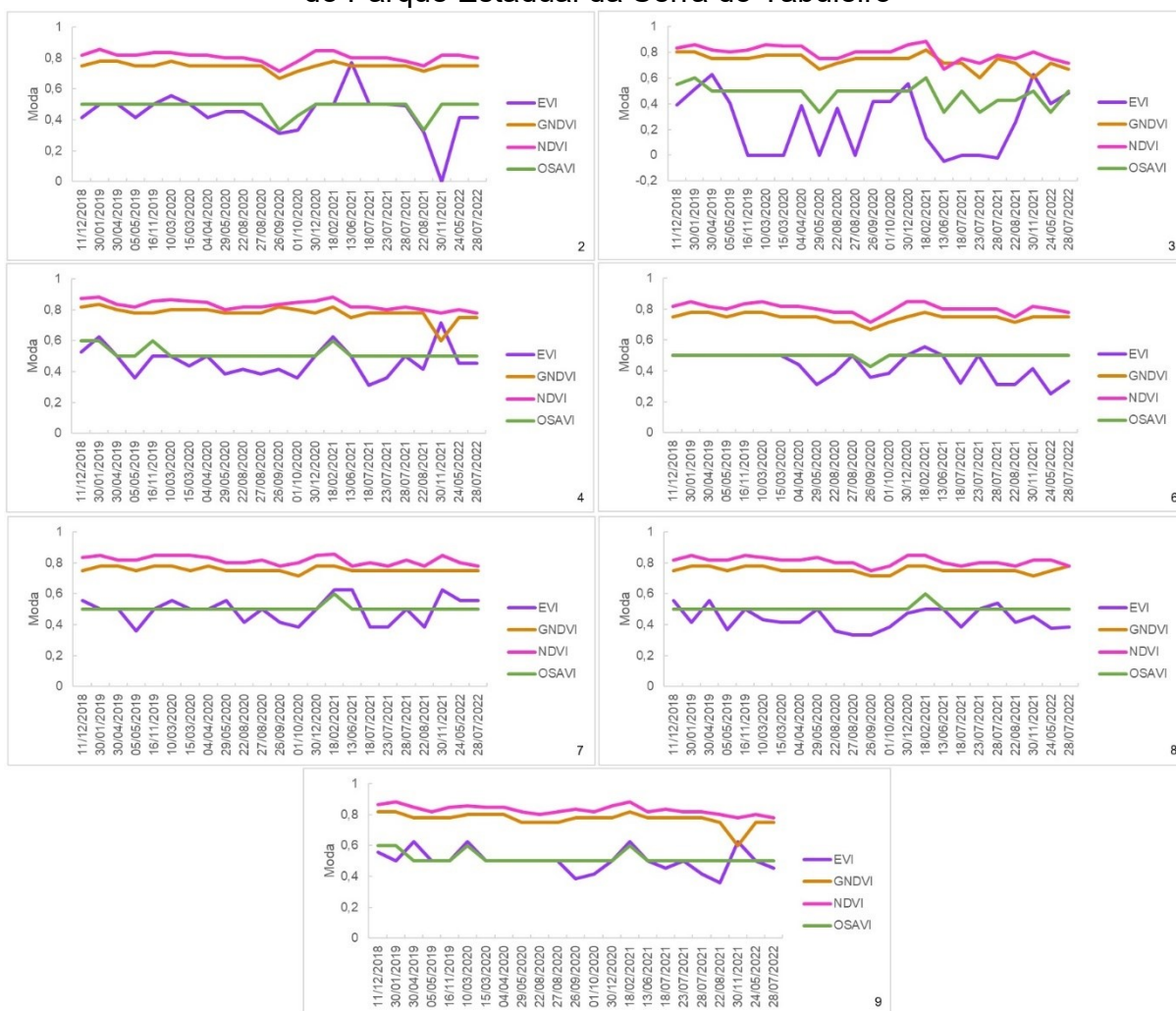
Nas bacias localizadas fora da área de preservação, os índices GNDVI e NDVI permaneceram praticamente os mesmos, enquanto o EVI apresentou alterações mais bruscas, com maior frequência de valores mais elevados compatíveis com períodos chuvosos. O OSAVI não apresentou tanta sensibilidade quanto os demais índices, demonstrando maiores oscilações apenas na unidade hidrográfica 3, onde observa-se que os valores do índice são mais elevados em períodos de maior pluviosidade, enquanto em períodos com chuva abaixo da média os valores também são reduzidos.

Figura 21 – Moda dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas dentro do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro



Fonte: Autoria própria, 2023.

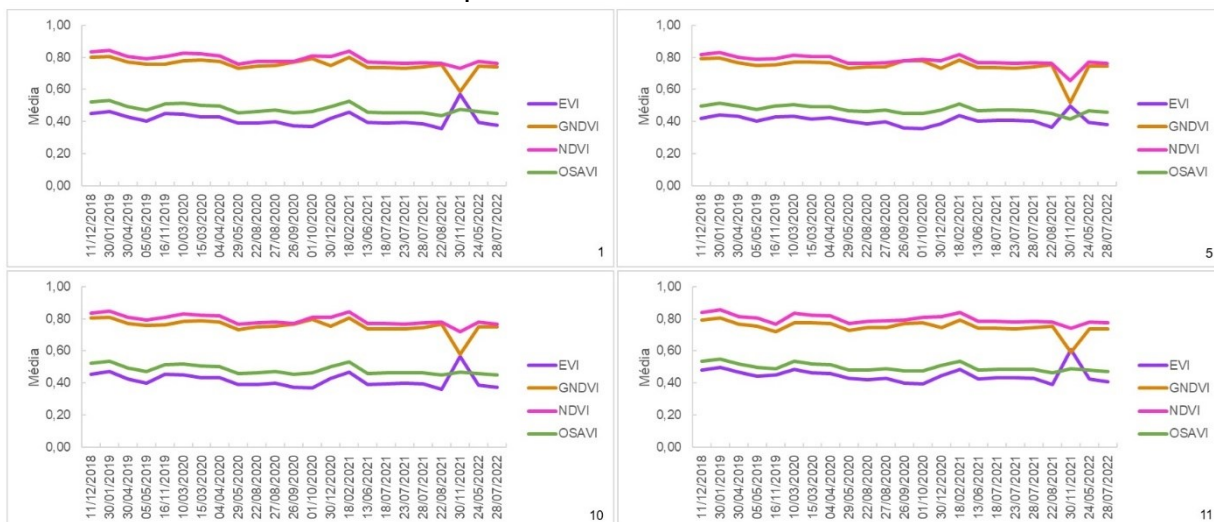
Figura 22 – Moda dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas fora do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro



Fonte: Autoria própria, 2023.

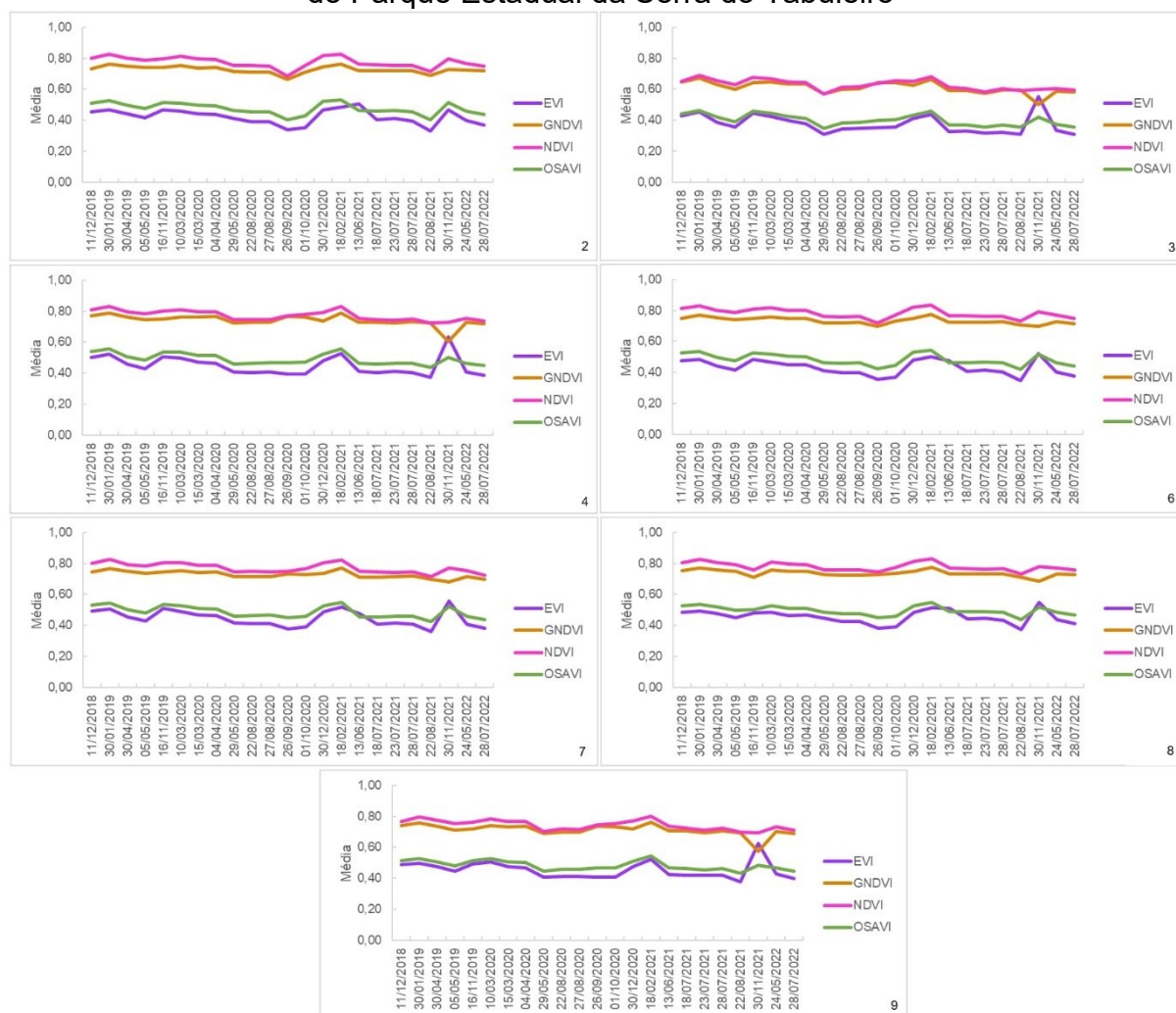
Nos gráficos das Figuras 23 e 24 têm-se as médias dos índices espectrais de vegetação nas bacias localizadas dentro e fora do PAEST e é possível constatar comportamentos similares aos anteriores, em que os valores são praticamente constantes, ocorrendo maior alteração no EVI e GNDVI no dia 30/11/2021.

Figura 23 – Média dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas dentro do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 24 – Média dos índices espectrais nas unidades hidrográficas localizadas fora do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro



Fonte: Autoria própria, 2023.

A Figura 15, a qual mostra as alterações do desvio padrão de cada índice espectral de vegetação na área de estudo desta pesquisa, mostrou que os índices NDVI e GNDVI apresentaram comportamentos semelhantes, com valores elevados especialmente na bacia “3”, o que parece estar relacionado com a localização da unidade hidrográfica e sua cobertura do solo, enquanto o EVI e o OSAVI apresentaram oscilações menos acentuadas entre as bacias selecionadas, demonstrando menor sensibilidade nesta situação.

Analisando a sensibilidade dos índices com relação à precipitação, conforme dito anteriormente, os desvios padrões dos índices NDVI, GNDVI e OSAVI apresentaram curvas semelhantes entre si, com oscilações não tão acentuadas, enquanto o EVI demonstra muitas vezes comportamento contrário e certa similaridade com as alterações do gráfico de pluviosidade, ocorrendo alguns pontos mais elevados

de desvio padrão em períodos mais chuvosos e alguns pontos em que ocorre redução do desvio padrão em momentos em que a precipitação esteve abaixo da média para o período.

Comparando-se a sensibilidade dos índices através de uma bacia com maior cobertura florestal e protegida pelo PAEST (bacia “1”, Figura 20) com uma bacia com menor cobertura florestal e desprotegida (bacia “3”, Figura 18), percebe-se que os índices espectrais têm maior desvio padrão no segundo caso, ficando evidente que ocorre maior variação dos índices em locais com menor cobertura florestal, mas não é possível deixar claro qual índice é mais sensível à precipitação, uma vez que o padrão pluviométrico não foi suficiente para alterar as características da vegetação em termos de reflectância no curto período analisado.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise da cobertura e uso do solo em algumas áreas selecionadas da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul de 1985 a 2021, foi possível verificar a evolução das áreas antropizadas através da urbanização, agropecuária e plantio de espécies exóticas. A importância do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro para a preservação da cobertura florestal e da biodiversidade fica clara quando se compara a evolução do uso do solo através dos anos, ainda que tenha ocorrido redução da vegetação nativa nas bacias selecionadas dentro do PAEST. Esta redução pode ser explicada por causas naturais, como a dinâmica da floresta, mas têm forte relação, principalmente, com desmatamentos ocorridos ao longo do tempo e de forma irregular.

As solicitações por parte de agricultores para a supressão da vegetação nativa em troca de atividades que deem retorno econômico (como plantio de espécies exóticas e agropecuária) mostram o descontentamento de parte da população local na conversão de áreas que poderiam ser utilizadas para outras atividades em locais para preservação integral. O aumento de áreas destinadas à agricultura e pecuária, assim como o aumento das áreas com espécies florestais exóticas (floresta plantada) no interior do Parque acende um alerta para a falta de fiscalização em áreas de proteção integral, considerando-se que o principal objetivo desta área é a preservação do ecossistema e, assim, trata-se de um local em que são proibidas atividades de exploração econômica.

A utilização de índices espectrais como o NDVI para a análise das alterações da cobertura do solo neste caso não se mostrou eficiente, visto que as mudanças ocorridas entre 11 de dezembro de 2018 e 28 de julho de 2022 não foram tão representativas. Considerando-se a existência de períodos com maiores registros de precipitação e de estiagem na região de estudo, recomenda-se que sejam utilizadas imagens da mesma época, a fim de reduzir possíveis interferências no comportamento espectral da vegetação.

Quando analisados os mapas gerados com as classes dos índices EVI, GNDVI e OSAVI para as mesmas épocas, foi observada sensibilidade ainda menor do que para o NDVI e, portanto, seriam necessários estudos mais aprofundados e por um período maior a fim de obter resultados mais satisfatórios.

Com a análise dos gráficos de desvio padrão dos índices NDVI, EVI, GNDVI e OSAVI na totalidade da área de estudo, foi possível observar que ocorreram respostas distintas, o que parece estar relacionado com a localização das unidades hidrográficas selecionadas. Nesta etapa, observou-se que especialmente o NDVI e o GNDVI apresentaram maior sensibilidade à localização e uso do solo, com picos acentuados de desvio padrão nas regiões com menor cobertura florestal e maior atividade antrópica.

Quando os gráficos de desvio padrão dos índices em algumas bacias dentro e fora do PAEST foram comparados com o gráfico de precipitação da região com a finalidade de observar o comportamento espectral da vegetação em épocas de ocorrência de variabilidade hídrica, não foi possível identificar uma relação clara, uma vez que o período analisado não foi o suficiente para identificar um padrão e ocasionar deficiência hídrica capaz de interferir significativamente nos processos fisiológicos das plantas de forma a alterar sua resposta espectral. Entretanto, analisando as mesmas unidades hidrográficas localizadas dentro e fora do Parque, foi possível observar que ocorre menor desvio padrão, ou seja, menores diferenças entre os valores dos índices espectrais, nos locais em que a cobertura florestal é predominante, enfatizando a relação dos índices com a localização e o uso do solo.

Com relação à sensibilidade dos índices escolhidos para esta pesquisa, pode-se observar nos gráficos da moda e média que os índices apresentaram comportamentos similares dentro e fora do PAEST, com exceção ao EVI, o qual apresentou maiores oscilações da moda nas duas situações (dentro e fora da área de preservação). Comparando os gráficos de desvio padrão com o gráfico de precipitação, foi possível observar que em alguns momentos a resposta do EVI corresponde aos níveis de precipitação, com as alterações dos valores do índice correspondendo aos níveis de chuva, enquanto os demais índices não demonstraram tanta sensibilidade quando confrontados com o gráfico da precipitação.

Por fim, com relação à localização e cobertura do solo, ficou evidente a sensibilidade dos índices espectrais de vegetação, sendo possível identificar, através dos gráficos de desvio padrão, que ocorre maior variação dos índices NDVI, GNDVI e OSAVI nas bacias localizadas fora do Parque Estadual da Serra do tabuleiro, mesmo quando estas apresentam maior cobertura florestal, enquanto nas bacias protegidas pelo Parque foram observados valores de desvio padrão consideravelmente menores,

indicando valores mais homogêneos. Neste sentido, entre os índices escolhidos para a pesquisa, o EVI apresentou menor sensibilidade às mudanças de cobertura do solo e apresentou alguns pontos mais altos de desvio padrão, os quais parecem coincidir com maiores registros de precipitação.

Sugere-se que as próximas pesquisas sobre a relação entre os índices espectrais de vegetação e os níveis de precipitação ocorram por um período maior, tendo em vista que a vegetação possui capacidade de manter recursos hídricos suficientes para seus processos fisiológicos e apenas um período de seca mais prolongado seria capaz de interferir nas respostas espectrais.

Acredita-se que, com o estudo de períodos de estiagem e precipitação bem definidos e por um período prolongado, visando definir um padrão para a região em questão, a utilização de índices espectrais de vegetação para a análise da preservação e comportamento da vegetação em áreas de mananciais possa ser de grande valia, auxiliando na previsão de períodos em que possa ocorrer deficiência na distribuição de água e na elaboração de planos que possam prevenir ou amenizar as ocorrências de falta de água.

REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; PEGORINI, E. S.; DALARMI, O. **A crise de água e os mananciais de abastecimento**. In: MANANCIAS DE ABASTECIMENTO: PLANEJAMENTO E GESTÃO – ESTUDO DE CASO DO ALTÍSSIMO IGUAÇU. Curitiba: Sanepar FINEP, 2003.
- BRANDÃO, Z. N. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- CÂMARA, G. **A pesquisa espacial no Brasil: 50 anos de INPE (1961-2011)**. Revista USP, São Paulo, n. 89, p. 234-243, 2011.
- CAMARGO, F. F.; ADAMI, M.; BREUNIG, F. M.; MANTELLI, L. R.; COSTA, M. C.; PONZONI, F. J.; FREITAS, J. G. **Avaliação de índices de vegetação e de índice de área foliar na caracterização espectral de dosséis de trigo (*Triticum aestivum*, L. – IAC-370)**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. Anais... Florianópolis: INPE, 2007.
- CASTRO, P. I. S.; ABREU JÚNIOR, C. A. M. **Análise da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação na sub-bacia do rio Urucuia, MG**. In: 13º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial. Anais... Florianópolis, 2018.
- COLMAN, E. A. **Vegetation and watershed management: an appraisal of vegetation management in relation to water supply, food control, and soil erosion**. The Ronald Press Company, New York, 1953.
- CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, 1992, 170 p.
- DOUBRAWA, A. **A Crise de água e sua possível relação com os parques remanescentes florestais na região oeste do estado de Santa Catarina**. 2007. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau – FURB, 2007.
- FERN, R. F.; FOXLEY, E. A.; BRUNO, A.; MORRISON, M. L. **Suitability of NDVI and OSAVI as estimators of green biomass and coverage in a semiarid rangeland**. Ecological Indicators, v. 98, p. 16-21, 2018.
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Observando os rios 2022: o retrato da qualidade da água nas bacias hidrográficas da Mata Atlântica**. São Paulo, 2022a.
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **30 anos de conservação do hotspot de biodiversidade da Mata Atlântica: desafios, avanços e um olhar para o futuro**. São Paulo, 2022b.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: Período 2019-2020.** São Paulo, 2021

FRAMPTON, W. J.; DASH, J.; WATMOUGH, G.; MILTON, E. J. **Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 82, p. 83-92, 2013.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. **Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS.** Remote Sensing of Environment, v. 58, 1996.

HANSEN, M. C.; ROY, D. P.; LINDQUIST, E.; ADUSEI, B.; JUSTICE, C. O.; ALTSTATT, A. **A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin.** Remote Sensing of Environment, v. 112, p. 2495-2513, 2008.

HUANG, C.; ZHOU, Z.; WANG, D.; DIAN, Y. **Monitoring forest dynamics with multi-scale and time series imagery.** Environmental Monitoring and Assessment, v. 188, 2016.

HUANG, S.; TANG, L.; HUPY, J. P.; WANG, Y.; SHAO, G. **A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing.** Journal of Forestry Research, v. 32, n. 1, p. 1-6, 2021.

KELLOGG, C. H.; ZHOU, X. **Impact of the construction of a large dam on riparian vegetation cover at different elevation zones as observed from remotely sensed data.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v.32, p.19-34, 2014.

KUPLICH, T. M.; MOREIRA, A.; FONTANA, D. C. **Série temporal de índice de vegetação sobre diferentes tipologias vegetais no Rio Grande do Sul.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 17, n. 10, p. 1116-1123, 2013.

LINHARES, C. A.; SOARES, J. V.; BATISTA, G. T. **Influência do desmatamento na dinâmica da resposta hidrológica na bacia do Ji-Paraná.** In: ANAIS XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Goiânia: INPE, 2005.

LINO, C. F.; DIAS, H. **Águas e florestas da Mata Atlântica: por uma gestão integrada.** São Paulo: Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, 2003, 132 p.

MAKARIEVA, A. M.; GORSHKOV, V.G. **Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land.** Hydrology and Earth System Sciences Discussions, EGU, p. 1013-1033, 2007.

MAPA das unidades hidrográficas de Santa Catarina. **EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina**, 2007. Disponível em: < https://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/pre_download_hidrograficas.jsp>. Acesso em 9 de fevereiro de 2023.

MATA Atlântica: o desafio de zerar o desmatamento no bioma onde vivem mais de 70% da população brasileira. **MapBiomas**, 2021. Disponível em: < <https://brasil.mapbiomas.org/2021/09/15/mata-atlantica-o-desafio-de-zerar-o-desmatamento-no-bioma-onde-vivem-mais-de-70-da-populacao-brasileira/>>. Acesso em 28 de dezembro de 2022.

MELLO, D. C.; NETO, L. G. M.; LANA, M. G.; FIORINO, P. **Uso e ocupação do solo**: comparação de índices NDVI e GNDVI e inferências sobre biomassa de dossel vegetal. *Cadernos de Agroecologia, Edição especial V Simpósio Mineiro de Ciência do Solo, Viçosa*, v. 15, n. 1, 2020.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. **Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da Microbacia Hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Cratêus – CE**. *Raega, Curitiba*, v. 23, p. 520-533, 2011.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; ROSA, A. N. C. S.; SANO, E. E.; SOUZA, E. B.; BAPTISTA, G. M. M.; BRITES, R. S. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB – Universidade de Brasília, 2012, 266 p.

MIRANDA JUNIOR, G. X.; RODRIGUES, M. L. G.; CRUZ, G. **A estiagem do outono 2020 em Santa Catarina**: a atuação da Epagri, da medição do dado à análise da informação. *Agropecuária Catarinense, Florianópolis*, v. 33, n. 2, p. 11-14, 2020.

NAKANO, T.; BAVUUDORJ, G.; URIANHAI, N. G.; SHINODA, M. **Monitoring aboveground biomass in semiarid grasslands using MODIS images**. *Journal of Agricultural Meteorology*, v. 69, p. 33-39, 2013.

NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J. **Introdução ao sensoriamento remoto**. São José dos Campos, 2001, 68 p.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher. 1989, 308 p.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010, 389 p.

OLIVEIRA, I. A. **Gestão de conflitos em parques**: estudo de caso do entorno nordeste do Parque Estadual da Serra do Tabuleiro – Praia da Pinheira – SC. 2005. 271 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

ORIGEM do INPE na corrida espacial. **INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 2021. Disponível em: < <https://www.gov.br/inpe/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/historia>>. Acesso em 27 de dezembro de 2022.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JUNIOR, V. P.; MASSIGNAM, A. M.; PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F. V. **Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis, Epagri, 2002.

PARQUE Estadual da Serra do Tabuleiro. **IMA – Instituto do Meio Ambiente**, 2019. Disponível em: < <https://www.ima.sc.gov.br/index.php/biodiversidade/unidades-de-conservacao/parque-estadual-da-serra-do-tabuleiro>>. Acesso em 18 de outubro de 2022.

PEDRALI, L. D.; MARCHESAN, J.; QUEIROZ, T. B.; BALDIN, T.; SOUSA, R. S.; BATISTA, F. J.; PEREIRA, R. S. **Comportamento espectral de espécies utilizadas em arborização urbana**. *Ecologia e Nutrição Florestal*, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 19-32, 2016.

PEREIRA, A.; ZANIN, C. **Expedição ao Rio Cubatão**. Florianópolis, 2002. Disponível em: <<https://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/expedicao-ao-rio-cubatao#0>>. Acesso em: 23 de março de 2023.

PEREIRA, G.; BENINI, S. M. **Parque Estadual Serra do Tabuleiro e o abastecimento de água da Grande Florianópolis/SC**. *Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes*, v. 9, n. 22, 2021.

PEREIRA, G.; FERREIRA, N. J.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S.; FREITAS, S. R. **Análise das áreas queimadas e das emissões dos gases do efeito estufa no Parque Estadual da Serra do Tabuleiro – Santa Catarina**. *Geosul*, Florianópolis, v. 24, n. 47, p. 113-130, 2009.

PITHAN, P. A.; JÚNIOR, M. A. S.; SEBEM, E. **Correlação entre o rendimento da soja e os dados de estiagem utilizando dados EVI/MODIS na região centro do Estado do Rio Grande do Sul – BR**. *Geoinfo*, Salvador, p. 86-91, 2017.

PLANO de recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Cubatão, Madre e Contíguas – PRH-CMC. **Etapa C: Diagnóstico dos recursos hídricos**. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina: Florianópolis, 2018.

PLANO estadual de recursos hídricos de Santa Catarina – PERH/SC. **Caracterização geral das regiões hidrográficas de Santa Catarina: RH8 – Litoral Centro**. Fundação CERTI: Florianópolis, 2017, 35 p.

POELKING, E. L.; LAUERMANN, A.; DALMOLIN, R. S. D. **Imagens CBERS na geração de NDVI no estudo da dinâmica da vegetação em período de estresse hídrico**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. Anais... Florianópolis, p. 4145-4150, 2007.

PONZONI, F.J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETO, J.S., (Eds). **Sensoriamento remoto: reflectância de alvos naturais**. Brasília: UNB/EMBRAPA, 2001.

RAMOS, P. R. **Modelo para Outorga de Uso da Água Utilizando a Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Cubatão do Sul**. Florianópolis, 2005. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

ROSA, P. A.; BRUNIG, F. M.; BALBINOT, R.; GALVÃO, L. S. **Dinâmica da floresta do Parque Estadual do Turvo com índices de vegetação**. Floresta e Ambiente, v. 20, n. 4, p. 487-499, 2013.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Uberlândia: EDUFU, 2003, 117 p.

ROSENDO, J. S. **Índices de vegetação e monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na bacia do rio Araguari – MG – utilizando dados do sensor MODIS**. 2005. 152 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHEEL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. Third ERTS Symposium, NASA, v. 1, p. 309-317, 1973.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Planejamento. **Atlas geográfico de Santa Catarina: diversidade da natureza: fascículo 2**. Florianópolis: Editora Udesc, 2016.

SARTORI, A. A. C.; SILVA, R. F. B.; PIANUCCI, M. N.; ZIMBACK, C. R. **Influência do período de estiagem no índice de vegetação (NDVI), no município de Botucatu-SP**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. Anais... Natal, p. 4363-4369, 2009.

SCUPINO, M. R. C.; MORATO, S. A. A.; CEOLIN, L. M.; MATUELLA, B. A.; SIQUEIRA, J. D. P.; FREITAS, L. A. S.; FONTOURA, G. O.; SOUZA, J. I.; BERTOGLIO, A. L. A. A.; SOUZA, N. L.; SCANDOLARA, M. R.; NASCIMENTO, V. M.; SANTOS, D. G.; FANTINEL, O. L. **Planejamento estratégico do programa produtor de água na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão: ferramentas para a gestão hídrica da Grande Florianópolis**. STCP Engenharia de Projetos Ltda., Curitiba; Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável, Florianópolis, 2019.

SDM – Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. **Plano Integrado dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Tubarão e Complexo Lagunar**. Volume III – Plano de Uso Integrado dos Recursos Hídricos. Florianópolis, 198 f. 2002.

SENTINEL – Missão Sentinel. **Embrapa**, 2020. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/sentinel>>. Acesso em 27 de dezembro de 2022.

SENTINEL-2. **Engesat**: soluções em imagens de satélite e geoprocessamento, 20---. Disponível em: < <https://www.engesat.com.br/sentinel-2/>>. Acesso em 18 de outubro de 2022.

SILVA, M. R.; RIBEIRO, M. G.; CENTENO, J. A. S. **Monitoramento de estiagens com imagens MODIS**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, 2007. Anais... Florianópolis: INPE, 2007.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. **Índice de Vegetação e Modelo Linear de Mistura Espectral no Monitoramento da região do Pantanal. Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 33, n. Especial, p. 1729-1737, 1998.

SIMINSKI, A.; FANTINI, A. C. **A Mata Atlântica cede lugar a outros usos da terra em Santa Catarina, Brasil**. Revista Biotemas, Florianópolis, v. 23, p. 51-59, 2010.

SOUZA, A. C.; SANTOS, D. M.; ROVARIS, D. V.; HENKES, J. A. **Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão Sul – Rio da Madre: problemática e políticas públicas**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, v. 9, n. 2, p. 836-848, 2020.

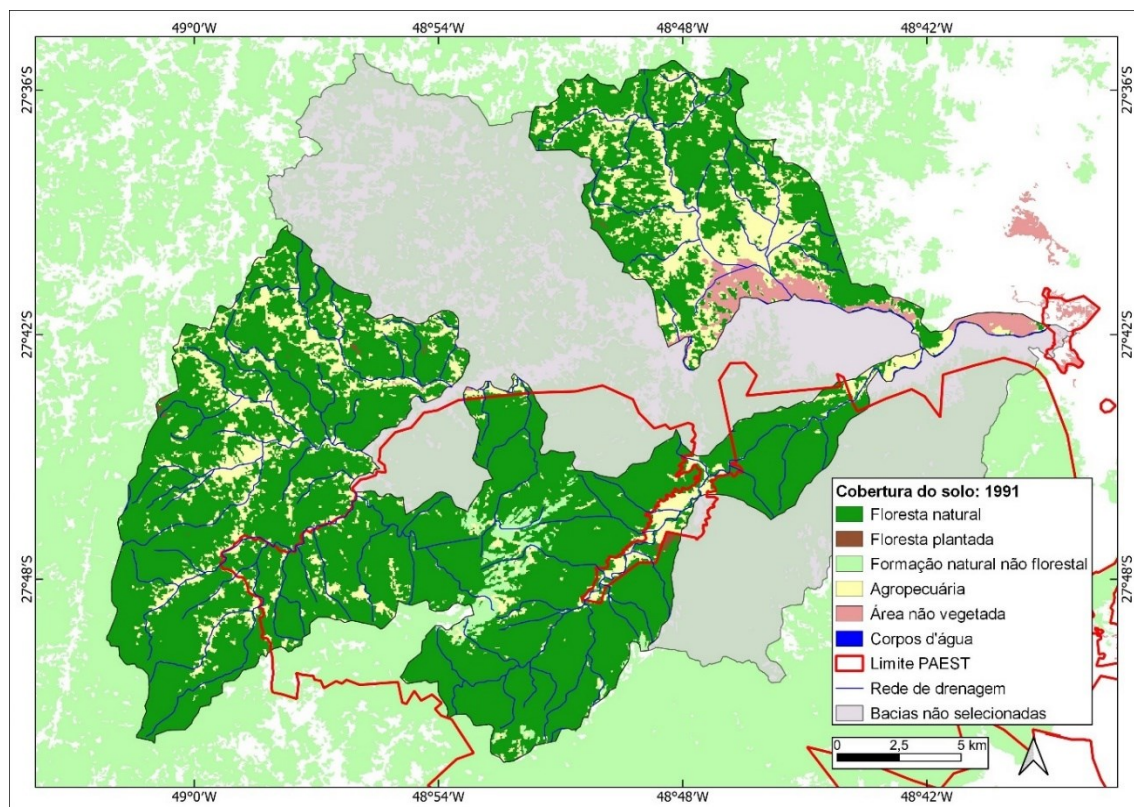
SOUZA JUNIOR, M. A.; SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. **Monitoramento de estiagem na região Sul do Brasil utilizando dados ENVI/MODIS no período de dezembro de 2000 a junho de 2009**. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba. Anais... Curitiba, p. 5901-5908, 2010.

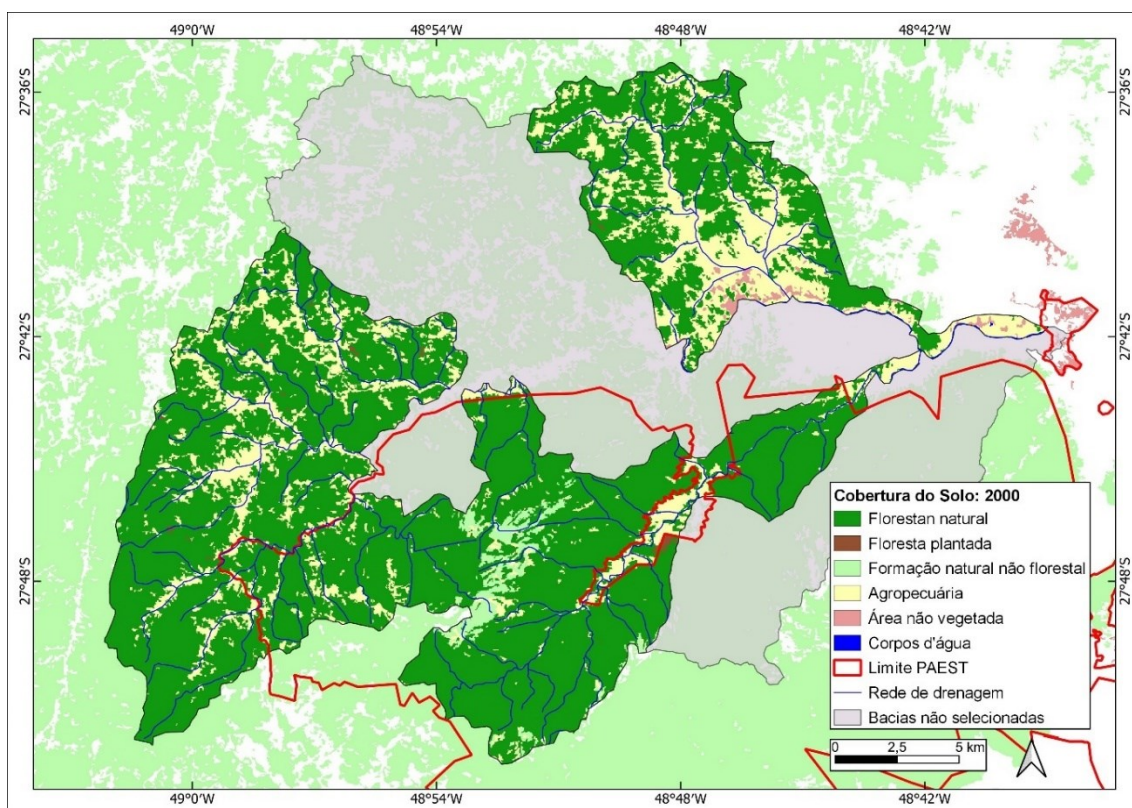
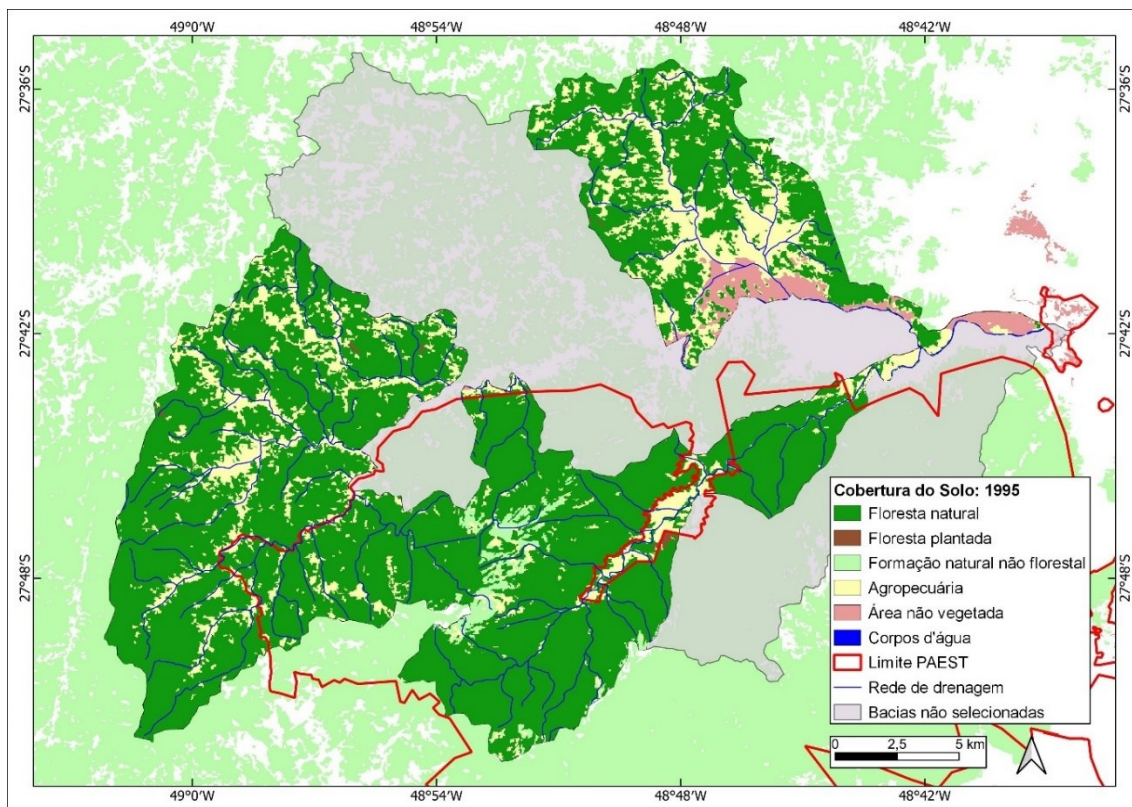
TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R.T. **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

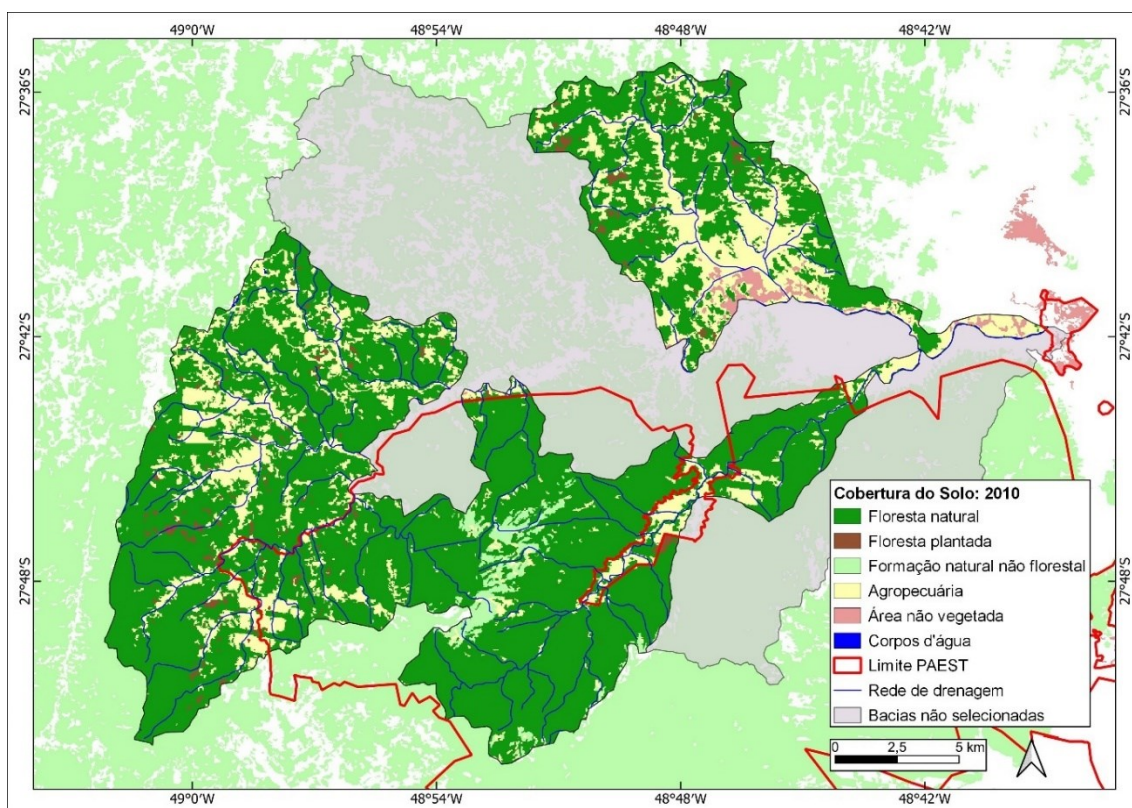
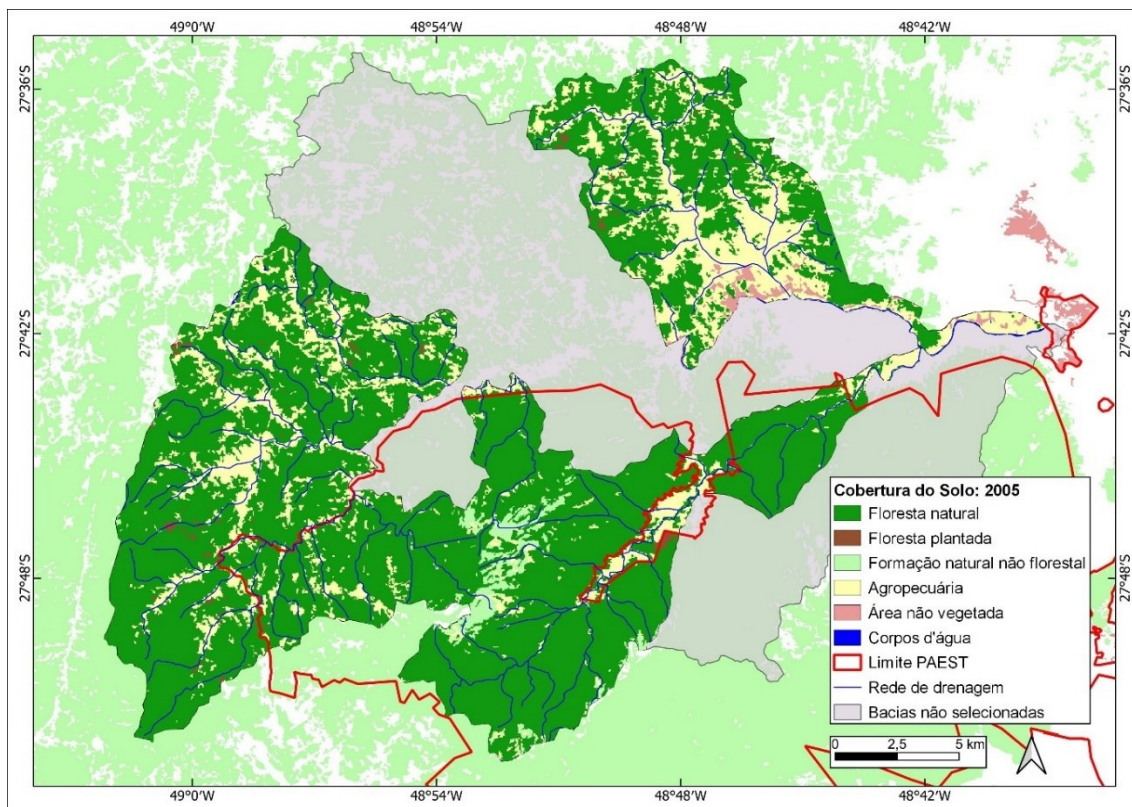
VIBRANS, A. C.; SCHRAMM, V. F. **Perfil temporal de EVI/NDVI na bacia hidrográfica do rio Itajaí em Santa Catarina**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. Anais... Natal: INPE, 2009.

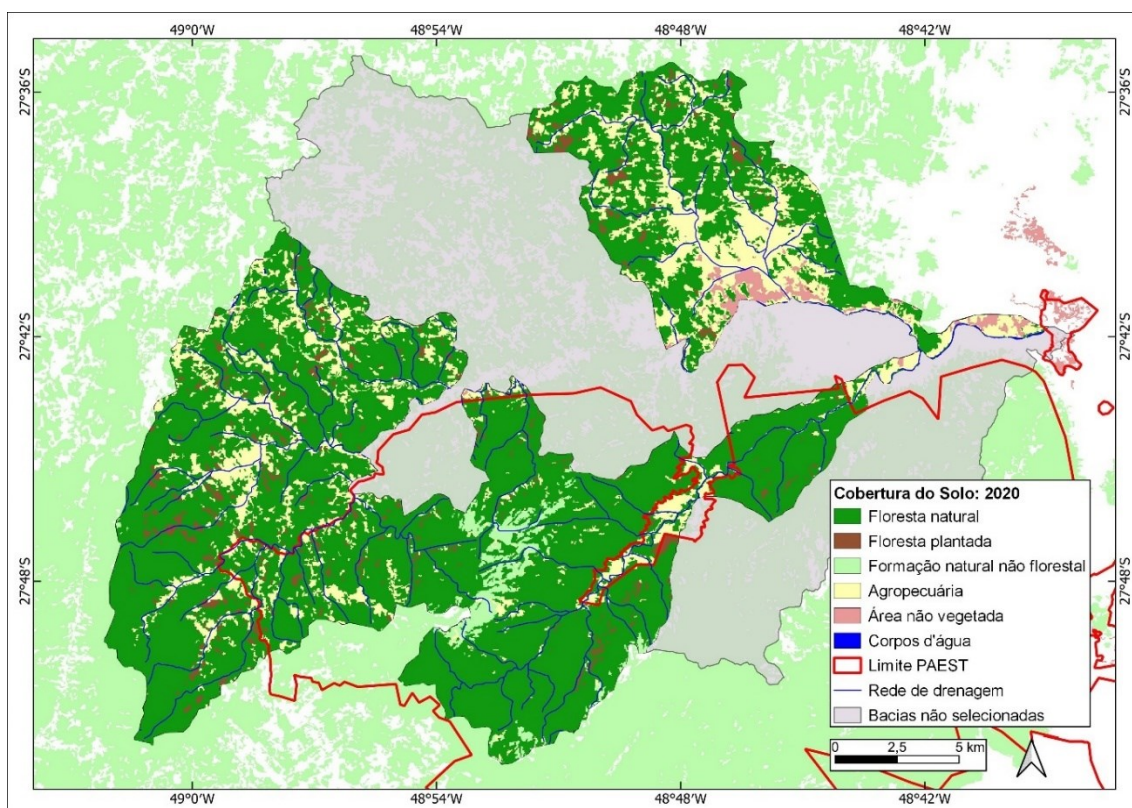
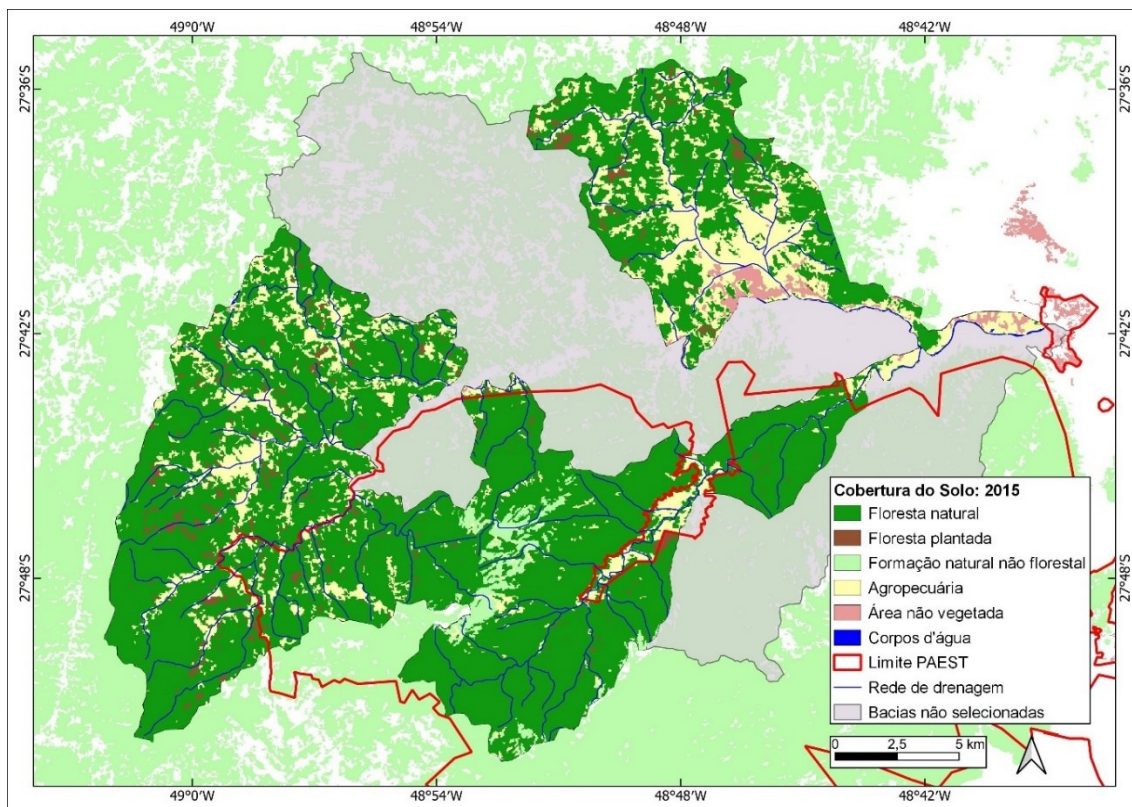
VOLPATO, M. M. L.; VIEIRA, T. G. C.; ALVES, H. M. R.; SOUZA, V. C. O.; MEIRELES, E. J. L.; SANTOS, W. J. R. **Determinação de estiagem em áreas cafeeiras no município de Patrocínio, MG, utilizando imagens MODIS/TERRA**. In: VI Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Vitória: Embrapa Café, 2009.

ANEXO A – Mapas de uso e cobertura do solo das unidades hidrográficas selecionadas na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul nos anos 1991, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020.









ANEXO B – Mapas das classes de EVI, GNDVI e OSAVI em 11/12/2018 e 28/07/2022.

