



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 1 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID34886>



Dinâmica espaço-temporal na cobertura e uso da terra em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil: análise baseada em sensoriamento remoto e big data

Spatiotemporal dynamics in the land cover and land use in a river basin in southern Brazil: analysis based on remote sensing and big data

Cristiane Scussel¹; Sylvia Christina de Lima²; Amanda Letícia de Meneses Mendes³; Marina Barros Santander⁴; Anderson Targino da Silva Ferreira⁵; Jairo José Zocche⁶; Carlos Henrique Grohmann⁷; José Alberto Quintanilha⁸

¹ Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Criciúma/SC, Brasil. Email: cris_scussel@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0242-5566>

² Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente, São Paulo/SP, Brasil. Email: sclima.br@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0453-9252>

³ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Sorocaba/SP, Brasil. Email: alm.mendes@unesp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0242-5566>

⁴ Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia, São Paulo/SP, Brasil. Email: marinabsantander@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7007-5467>

⁵ Faculdade Tecnológica do Estado de São Paulo, Tecnologia em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Jaú/SP, Brasil. Email: andersontsferreira@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0440-6273>

⁶ Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Criciúma/SC, Brasil. Email: jjz@unesp.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2291-3065>

⁷ Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente, São Paulo/SP, Brasil. Email: guano@usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5073-5572>

⁸ Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente, São Paulo/SP, Brasil. Email: jaquinta@usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3261-7825>

Resumo: A exploração dos recursos naturais é alvo de preocupação, visto que o crescimento econômico interfere no equilíbrio ambiental. Este estudo analisou as mudanças espaço-temporais na cobertura e uso da terra (CUT) na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (BHRA), sul de Santa Catarina, Brasil, no período de 2016-2023. Foram utilizadas imagens do satélite Sentinel 2A, selecionadas as bandas RGB, NIR e SWIR 1 e, aplicados os índices EVI2, MNDWI e NDBI, o que resultou na seleção de oito classes de CUT. As imagens orbitais foram classificadas por meio de rotinas de programação no *Google Earth Engine* (GEE) e a validação foi realizada a partir da obtenção de dados gerados pela plataforma. Os resultados evidenciaram acurácia geral de 93% para os dois anos. A classe Floresta Nativa foi a mais representativa e aumentou cerca de 1,62% nos últimos sete anos. Área Construída foi a classe que mais cresceu, e a classe Pastagem/Vegetação Herbácea teve redução de 5,6%. Os resultados revelaram mudanças tênues na paisagem, mantendo áreas com florestas nativas e incremento da expansão urbana. Esses dados podem auxiliar as políticas públicas e as tomadas de decisão no gerenciamento do território da bacia com viés para a conservação e preservação dos recursos naturais.

Palavras-chave: Degradação ambiental; Aprendizado de máquina; Árvores de decisão.

Abstract: The exploitation of natural resources is of concern because economic growth results in negative impacts on environmental balance. This study analyzed the spatiotemporal changes in land cover and land use (LULC) in the Araranguá River Watershed (ARW), southern of Santa Catarina state, south Brazil, in the period of 2016-2023. Images from the Sentinel-2A satellite were used, the RGB, NIR and SWIR 1 bands were selected and the EVI2, MNDWI, NDBI indices were applied, which resulted in the selection of eight LULC classes. The orbital images were classified using programming routines in Google Earth Engine (GEE) and validation was performed by obtaining data generated by the platform. The overall accuracy was 93% for both years assessed. The Native Forest class was the most representative and increased by 1.62% in the last seven years. The Built Area class grew the most, and Pasture/Herbaceous Vegetation class decreased by 5.6%. The results revealed slight changes in the landscape, with areas with native forests being maintained and urban expansion occurring. These data can help public policy makers and decision makers to manage the basin territory with a bias towards the conservation and preservation of natural resources.

Keywords: Environmental degradation; Machine learning; Decision trees.

Recebido: 17/12/2023; Aceito: 07/02/2024; Publicado: 08/03/2024.

1. Introdução

A exploração dos recursos naturais é preocupante porque o crescimento econômico resulta em impactos negativos para o equilíbrio ambiental. Este tema é amplamente discutido na tentativa de estabelecer o uso racional dos recursos naturais (CONTERATO, 2000; KREBS; ALEXANDER, 2000). Os processos de urbanização e as atividades agrícolas são as principais causas das mudanças, que se estabelecem em espaços reservados à conservação da biodiversidade (ALTIERI, 2001) como, por exemplo, nas matas nativas e nas matas ciliares, que têm grande influência na qualidade dos corpos hídricos (SILVA *et al.*, 2023; VOGEL; ZAWADZKI; METRI, 2009) e, conseqüentemente, potencializa os impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana.

O cenário acima descrito, coincide com a realidade dos mais de 3.000km² da área de interesse deste estudo, a BHRA, que está localizada no sul de Santa Catarina. A colonização europeia deste vasto território iniciou-se nas primeiras décadas do século XIX (DALL'ALBA, 1997; HOBOLD, 1994), com agricultura familiar, atividades agropastoris, ocupação urbana (SANTA CATARINA, 1997), exploração madeireira (SCHEIBE; BUSS; FURTADO, 2010) e a mineração de carvão (CAMPOS, 2001), sendo as atividades que mais causaram degradação ambiental (KREBS, 2004). Estudos como de Marcon, Zocche e Ladwig (2014) e Pereira (2023) destacaram a expansão acelerada dos espaços urbanos em direção às várzeas e às Áreas de Preservação Permanente (APP) nas últimas décadas, indicando assim, aos gestores públicos e à população, a necessidade de mais atenção à gestão territorial, uma vez que a conservação destes espaços naturais é extremamente necessária para garantir o equilíbrio dos ecossistemas.

Nas bacias hidrográficas, a obtenção de informações detalhadas e precisas sobre o espaço geográfico é importante para o planejamento e a tomada de decisões (ARAÚJO; MENESES; SANO, 2009). A grande maioria dos estudos publicados sobre mapeamentos de cobertura e uso da terra, tratam de áreas rurais, utilizam imagens LANDSAT e classificam através de métodos clássicos (MARTINS *et al.*, 2023). Contudo, as geotecnologias, que incluem o processamento de grandes conjuntos de dados (*big data*) na nuvem e aplicações via *machine learning*, aparecem como alternativas viáveis para análises geoespaciais. Dessa forma, o GEE torna-se interessante por ser uma plataforma baseada em nuvem, facilitando o acesso a recursos computacionais de alto desempenho para processamento de grandes quantidades de dados (GORELICK *et al.*, 2017).

Dado o passado de exploração predatória que resultou em considerável conversão de áreas cobertas por mata nativa, em usos diversificados na região Sul de Santa Catarina, é fundamental conhecer como se caracteriza atualmente a paisagem da BHRA para garantir seu manejo adequado. Nesse sentido, o presente estudo utiliza a plataforma GEE e o Sistema de Informações Geográficas (SIG) para analisar as mudanças espaço-temporais no uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, com foco na degradação ambiental causada pelos tipos de uso.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

A BHRA está localizada no sul de Santa Catarina (Figura 1). Ocupa uma área de aproximadamente 3.000 km², abrangendo o território de 16 municípios, dos quais dez (Ermo, Forquilha, Maracajá, Meleiro, Morro Grande, Nova Veneza, Siderópolis, Timbé do Sul, Treviso e Turvo) estão totalmente localizados na bacia, e os seis restantes (Araranguá, Balneário Arroio do Silva, Balneário Rincão, Criciúma, Içara e Jacinto Machado) estão parcialmente inseridos (KREBS, 2004; COMASSETTO, 2008; PERH/SC, 2017). Considerando todos, o total de habitantes é de 488.902 (IBGE, 2023).

A BHRA é caracterizada por dois climas diferentes, sendo 77,8% Cfa (subtropical mesotérmico úmido com verões quentes) e 22,2% Cfb (subtropical mesotérmico úmido com verões amenos) (PERHSC, 2017). A temperatura média anual varia entre 17 e 19,3°C, onde, em janeiro as médias mais quentes ficam entre 23,4 e 25,9°C e, em julho, estas tendem a ser mais frias, ficando entre 12 e 15°C (ALVARES *et al.*, 2013). A precipitação anual varia de 1.200 a 1.600mm (BACK, 2020).

O Sul de Santa Catarina caracteriza-se por possuir uma das mais importantes bacias hidrográficas do litoral catarinense com cabeceiras que drenam amplas áreas, desde as escarpas da Serra Geral atravessando uma extensa planície costeira, até desaguar no Oceano Atlântico (KREBS, 2004). A BHRA possui aproximadamente 15 cursos d'água, dos quais destacam-se os rios Mãe Luzia, Manoel Alves e Araranguá (KREBS, 2004). Quanto ao relevo, as altitudes variam entre 0 e 1.500m, desde a Planície Costeira até as escarpas da Serra Geral, alternando entre planas e montanhosas (SANTA CATARINA, 1998). Os solos predominantes são o Gleissolo Háptico (28,53%), Cambissolo Háptico (23,6%) e Neossolo Litólico

(18,92%) (PERHSC, 2017). Em relação às regiões fitoecológicas, a maior parte da BHRA é coberta pela Floresta Ombrófila Densa (DOF) e, em menor proporção, pela Vegetação Costeira (KLEIN, 1978).

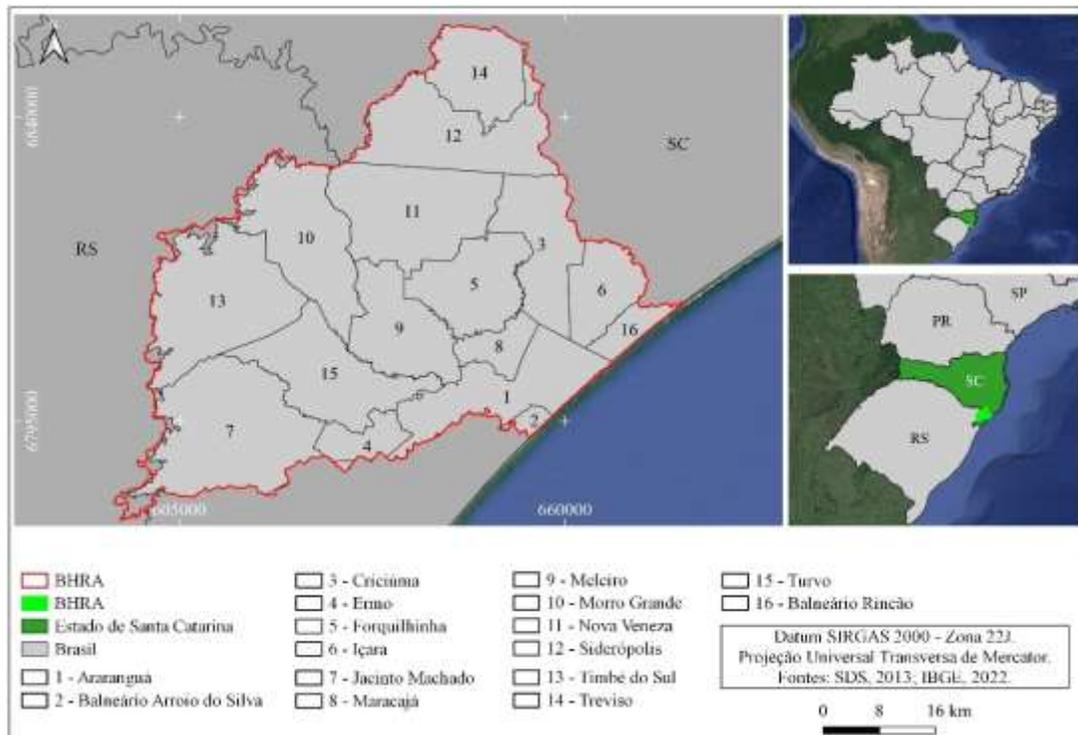


Figura 1 – Localização da BHRA e municípios que a compõem, no Sul de Santa Catarina, Brasil.
Fonte: Autores (2023).

2.2 Aquisição e processamento de imagens

As etapas metodológicas envolvidas são as seguintes: 1) aquisição de imagens orbitais; 2) geração de índices espectrais; e 3) produção e validação de mapas temáticos (Figura 2). O satélite Sentinel-2 (S2) faz parte do programa Copernicus da Agência Espacial Europeia. Com resolução espacial de até 10m, é capaz de fornecer imagens multiespectrais em 13 bandas, que vão do visível ao infravermelho. Sua resolução temporal de 5 dias o torna ideal para diversas aplicações, incluindo análises de uso do solo de curto prazo, que auxiliam na detecção de mudanças rápidas nas paisagens, como transformação e/ou degradação (DRUSCH *et al.*, 2012). As imagens orbitais foram customizadas através de rotinas de programação *JavaScript* e algoritmos utilizando o *Code Editor* disponível na plataforma de processamento em nuvem GEE. Portanto, foram selecionadas duas imagens, cujas datas foram derivadas da mediana entre 1º de março e 30 de abril, respectivamente, para os anos de 2016 e 2023.

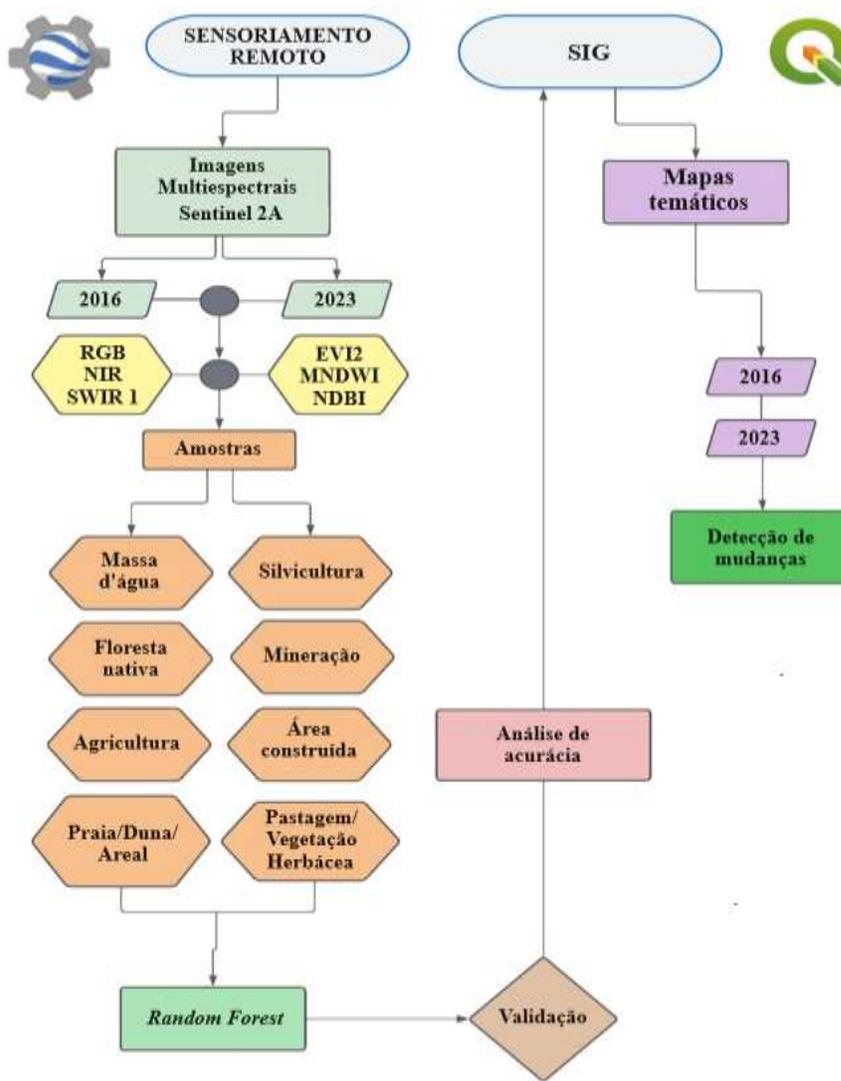


Figura 2 – Fluxograma de trabalho.
 Fonte: Autores (2023).

Considerando as bandas B2, B3, B4, B8 e B11 responsáveis pela refletância espectral nos comprimentos de onda Azul, Verde, Vermelho, Infravermelho Próximo e Infravermelho de Ondas Curtas, foram utilizados os seguintes índices espectrais: *Enhanced Vegetation Index* (EVI2, Equação 1) que, a partir da supressão da faixa azul (influenciada por efeitos atmosféricos), otimiza a sensibilidade de regiões com elevada biomassa (JIANG et al., 2008); *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI, Equação 2), que substitui a faixa do infravermelho próximo pela faixa do infravermelho médio para obter melhores resultados em regiões que possuem áreas e corpos d'água inundados (XU, 2008); e *Normalized Difference Built-Up Index* (NDBI, Equação 3), para melhorar a identificação de áreas construídas (ZHA; GAO; NI, 2003).

$$EVI2 = 2,5 \cdot (B8 - B4) / (B8 + 6 \cdot B4 + 2,4 \cdot B2 + 1) \quad (1)$$

$$MNDWI = (B3 - B11) / (B3 + B11) \quad (2)$$

$$NDBI = (B11 - B8) / (B11 + B8) \quad (3)$$

Vale ressaltar que, para as imagens utilizadas no EVI2 foi utilizado um filtro Laplaciano. Isso enfatiza as bordas ao redor dos objetos ou recursos de uma imagem para facilitar sua análise. A filtragem espacial foi realizada através de uma matriz retangular bidimensional que detecta as bordas (*convolution kernel* de janela 3x3) (GONZALEZ; WOODS; EDDINS, 2009).

2.3 Classificação de imagens

Para a classificação das imagens, foram geradas oito classes que representavam as diferentes formas de CUT na paisagem: Massa D'água, Floresta Nativa, Agricultura, Área Construída, Silvicultura, Mineração, Praia/Duna/Areal e Pastagem/Vegetação Herbácea. Eles foram identificados visualmente, por meio de imagens obtidas através da criação de polígonos distribuídos aleatoriamente pela área de estudo utilizando elementos como tonalidade/cor, forma e textura, conforme Florenzano (2002) (Tabela 1). Além disso, foram baseados em imagens multiespectrais do visível ao infravermelho (B2, B3, B4 e B8), bem como índices espectrais (EVI2, MNDWI e NDBI) com filtragem espacial.

Tabela 1 – Chave de interpretação.

Classe	Critério	Imagem Sentinel 2A
Massa D'água (MAG)	Rios, lagoas e reservatórios com tonalidades de azul, forma irregular e textura lisa.	
Floresta Nativa (FNA)	Floresta Ombrófila Densa e Restinga arbórea com tonalidades de verde escuro, forma irregular e textura rugosa.	
Agricultura (AGR)	Cultivos anuais com tonalidades variadas de verde e marrom, forma regular e textura média.	
Área Construída (ACO)	Construções civis com tonalidades variadas de cinza e vermelho claro e verde fosco, forma regular e textura rugosa.	
Silvicultura (SIL)	Monoculturas de pinus e eucaliptos com tonalidades de verde escuro, forma regular e textura lisa.	
Mineração (MIN)	Extração de carvão e areia, com tonalidades em roxo, forma regular e textura rugosa média.	
Praia, Duna e Areal (PDA)	Solos arenosos com tonalidades de branco e bege claro, forma irregular e textura fina.	

Pastagem e Vegetação Herbácea (PVH) Campos com vegetação rasteira com tonalidades de verde claro, forma irregular e textura fina.



Fonte: Autores (2023).

A classificação utilizou o algoritmo supervisionado *Random Forest*, com 100 árvores, calibrado e validado, utilizando 70% e 30% das áreas de treinamento, respectivamente (FERREIRA *et al.*, 2023; GORELICK *et al.*, 2017). As áreas de treinamento foram calculadas a partir da diferença entre os anos de 2016 e 2023 para cada classe da BHRA, por meio de planilhas do Google. Os mapas temáticos com a classificação final derivada do GEE foram produzidos no software QGIS, v. 3.16.5.

2.4 Análises de mudanças

As mudanças no cenário da BHRA foram detectadas e analisadas a partir de interpretações visuais comparativas entre as imagens classificadas de 2016 e 2023, na plataforma de dados do GEE. As análises das alterações consideraram todas as formas de uso da terra existentes na BHRA, e foi específica para a cobertura da terra que considerou áreas cobertas por mata nativa, incluindo o ambiente de Restinga, na região litorânea, e a Floresta Ombrófila Densa (FOD), que estende-se até a Serra Geral. Os dados quantitativos gerados, bem como os mapas temáticos produzidos, também foram utilizados para comparação e detecção de mudanças.

3. Resultados

3.1 Validação da classificação

Para o ano de 2016, a grande maioria das classes apresentou valores de acerto significativos, entre 90 e 99% (Tabela 2). O maior percentual de erro de omissão foi encontrado na classe ACO (13,18%), que teve taxa de acerto de 86,82% e foi erroneamente confundida com a classe AGR. Praias, dunas e areais possuem naturalmente cores claras, o que levou o classificador a confundi-las com residências, resultando em uma precisão de 88,46% na classificação de 2023. Notavelmente, para todas as classes, nos dois anos, o acerto nas classificações ultrapassou 86% e o acerto global foi de 93%.

Tabela 2 – Acurácia geral da classificação, por classe e em percentual.

Classe	Acurácia do produtor (%)		Acurácia do usuário (%)	
	2016	2023	2016	2023
Massa D'água (MAG)	98,15	98,15	99,32	98,65
Floresta Nativa (FNA)	92,45	90,82	91,34	92,64
Agricultura (AGR)	86,36	87,88	91,10	89,69
Área Construída (ACO)	85,99	83,84	86,82	91,06
Silvicultura (SIL)	90,07	91,05	90,69	89,91
Mineração (MIN)	97,96	98,68	94,43	96,15
Praia/Duna/Areal (PDA)	98,99	97,68	93,33	88,46
Pastagem/Vegetação Herbácea (PVH)	94,50	95,90	96,05	95,30
Acurácia geral	93%			

Fonte: Autores (2023).

3.2 Classificação da cobertura e uso da terra

A paisagem da BHRA é caracterizada por um mosaico espacialmente heterogêneo e é marcada pela influência de atividades antrópicas, que juntas, ocupam mais de 60% do território. A cobertura vegetal nativa, representada principalmente pela FOD, está associada ao uso agrícola e concentra-se fortemente nas encostas da Serra Geral. As formações pioneiras da Restinga estão inseridas na área de influência marinha. A Figura 3, apresenta mapas com os resultados das classificações de cobertura e uso da terra para os anos de 2016 e 2023.

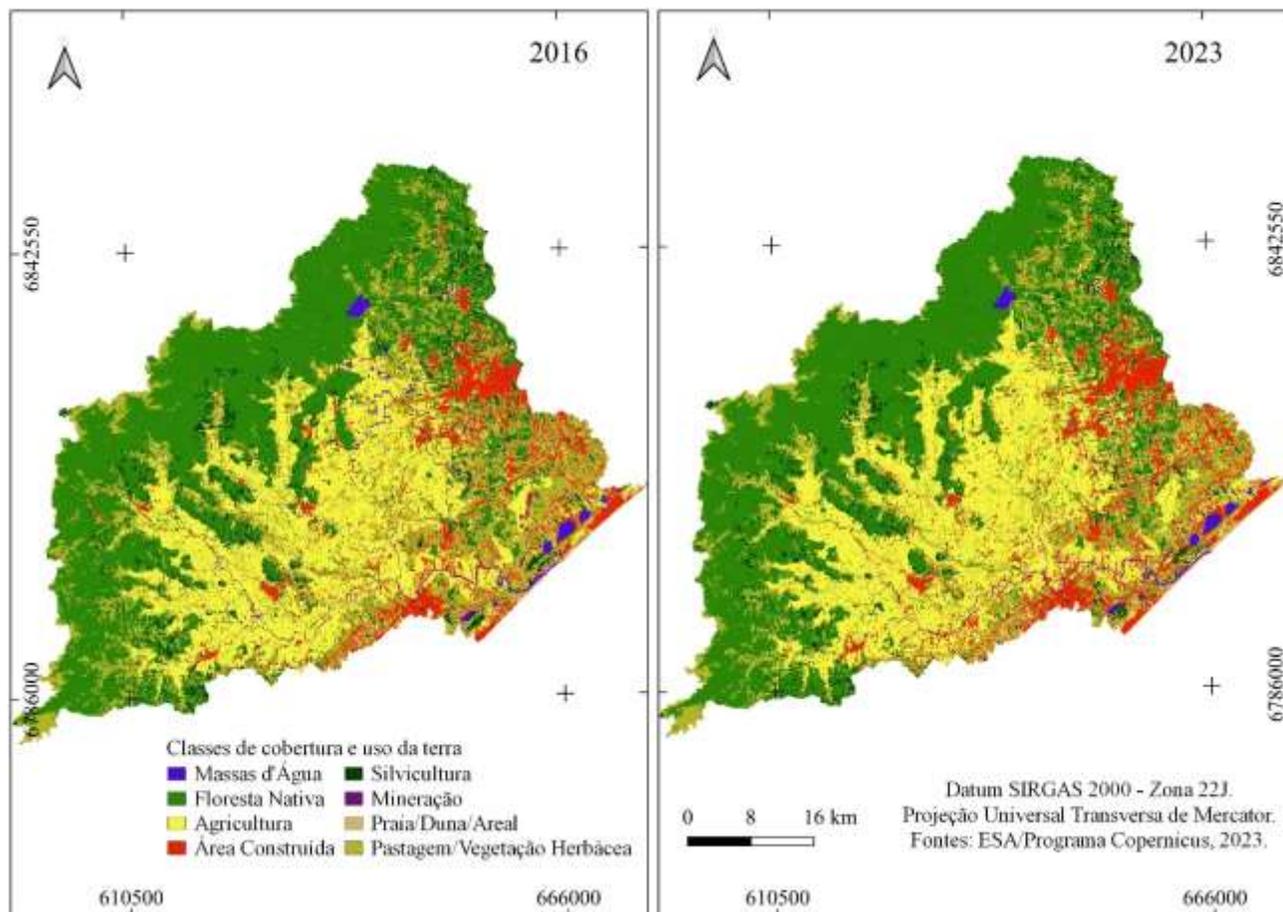


Figura 3 – Mapas de cobertura e uso da terra da BHRA nos anos de 2016 e 2023.

Fonte: Autores (2023).

A área da classe FNA foi a mais representativa no mapeamento dos dois anos, seguida pela classe AGR. A primeira contabilizou 34,45% em 2016 e 36,13% em 2023, com aumento de área de 1,68% nos últimos sete anos (Tabela 3). A maior parte do espaço que a caracteriza, se concentra em altitudes mais elevadas porque esta condição física dificulta o avanço das diferentes formas de uso na paisagem. O aumento sutil das áreas de mata nativa também indica a inaplicabilidade da legislação ambiental, no que diz respeito à preservação de corpos hídricos que, em razão da rizicultura, fazem com que o plantio de arroz irrigado permaneça dentro dos limites das APPs hídricas, ocupando espaço que deveria ser de mata ciliar (Figura 4). Ressalta-se que, devido à reduzida extensão de mata ao longo dos cursos d'água/rios, o algoritmo não conseguiu classificá-la como FNA. Em relação às áreas destinadas ao plantio agrícola, notou-se a grande extensão de área destinada a uma única forma de ocupação que se mantém há mais de um século.

Tabela 3 – Dados de área e percentuais das classes de cobertura e uso da terra da BHRA.

Classe	2016		2023		Mudança (%)
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	
Massa d'água (MAG)	66,04	2,16	52,14	1,70	-0,46
Floresta nativa (FNA)	1.055,18	34,45	1.110,00	36,13	1,68
Agricultura (AGR)	762,52	24,89	814,46	26,51	1,62
Área Construída (ACO)	260,45	8,50	343,00	11,16	2,66
Silvicultura (SIL)	253,02	8,26	216,17	7,04	-1,22
Mineração (MIN)	15,95	0,52	27,00	0,88	0,36
Praia/Duna/Areal (PDA)	22,95	0,75	52,93	1,72	0,97
Pastagem/Vegetação Herbácea (PVH)	627,19	20,47	456,55	14,86	-5,61
Total	3.063,30	100	3.072,25	100	

Fonte: Autores (2023).

As demais classes apresentam percentuais de ocupação territorial inferiores aos listados acima, onde as áreas de mineração de carvão e areia obtiveram os menores percentuais nos dois anos. Considerando os avanços das atividades humanas nos últimos anos, a classe que obteve o maior aumento na paisagem da bacia desde 2016 foi a ACO, com ganho de 82,55km².

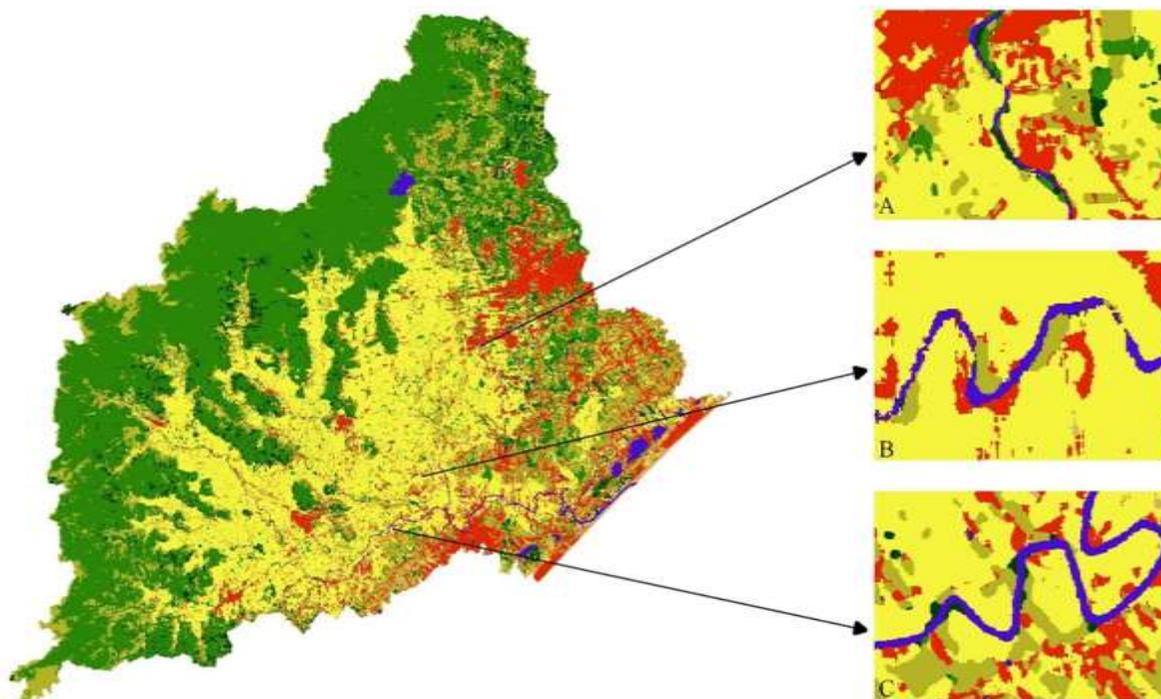


Figura 4 – Cobertura e uso da terra em Áreas de Preservação Permanente hídricas no ano de 2023. (A) Rio Mãe Luzia, (B) Rio Manoel Alves e (C) Rio Araranguá.

Fonte: Authors (2023).

Outra forma de uso da terra que aumentou foi a AGR, ocupando 1/4 da área total da bacia, com avanço de 51,94km² nos últimos sete anos. Atualmente é considerada a segunda classe mais representativa, evidenciando assim a influência tradicional da agricultura na dinâmica espaço-temporal da paisagem. Os menores aumentos ocorreram nas classes MIN e PDA, com menos de 1% cada. Algumas formas de uso da terra tiveram as áreas convertidas para outras atividades antrópicas. Destaca-se a classe PVH, que reduziu sua área em cerca de 170,64km². Muitas áreas de pastagens/vegetação herbácea foram substituídas por expansão urbana, plantio de culturas agrícolas de arroz e soja, consolidando cada vez mais a produção de grãos na região.

Os resultados da pesquisa também revelaram queda nas áreas destinadas à SIL. Esta classe sofreu diminuição de 36,85km² em 2023 principalmente porque algumas áreas foram abandonadas, facilitando o processo sucessional da vegetação nativa e até aumentando as áreas de FNA, principalmente em locais de altitudes mais elevadas. As áreas ocupadas por MAG sofreram perda equivalente a 14,26km² nos últimos sete anos.

Assim, as alterações na paisagem da bacia foram mais significativas para as áreas de pastagem, onde de (a) para (c), observou-se que ao longo dos sete anos a expansão urbana (instalação de loteamentos) ocorreu em direção à área de PVH; e de (b) para (d), notou-se um incremento das florestas nativas em direção às áreas de pastagens. Também foi observada substituição de áreas destinadas à silvicultura por áreas florestadas (Figura 5).

Relativamente à classe MIN, os valores mantiveram-se estáveis ao longo dos últimos sete anos. Isso inclui áreas de extração mineral, como carvão, areia e argila, que impactaram negativamente o meio ambiente no último século. Com base nos dados apresentados acima, infere-se que as formas de uso da terra existentes atualmente sofreram pequenas alterações significativas na paisagem da bacia.

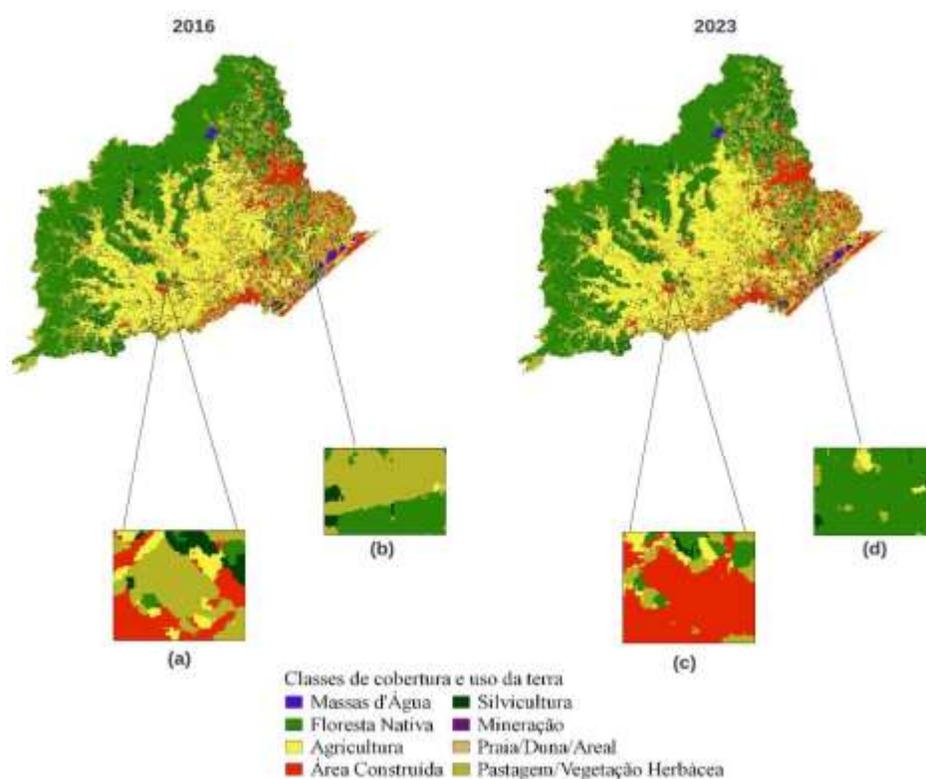


Figura 5 – Detecção de mudanças na cobertura e uso da terra da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá. Aumento da classe Área Construída de (a) para (c) e da classe Floresta Nativa de (b) para (d), além da diminuição da classe Pastagem ou Vegetação Herbácea em (c) e (d).

Fonte: Autores (2023).

4. Discussão

A matriz de erros e as precisões associadas ao Consumidor, ao Produtor e à Acurácia Geral devem ser os elementos centrais de uma avaliação da precisão de uma classificação (STEHMAN; FOODY, 2019). A semelhança entre as formas lineares das construções civis e a geometria retangular resultante das culturas agrícolas pode ter sido um fator para que algumas áreas da classe ACO fossem atribuídas a áreas agrícolas e vice-versa. Além disso, esse resultado pode ser conferido à semelhança espectral obtida por determinados alvos, onde o classificador encontrou dificuldade em distinguir adequadamente as construções urbanas das áreas agrícolas em estado de pousio para determinadas culturas como feijão, milho e tabaco, evento que ocorreu na região no período analisado.

Mesmo assim, os resultados indicam que o método baseado em árvores de decisão associou efetivamente os pixels às amostras de treinamento em todas as classes, qualificando as classificações para os dois anos. Os dados gerados validam outros estudos que utilizaram o algoritmo *Random Forest*, onde proporcionou altos níveis de precisão quando integrado ao GEE (CARVALHO; FILHO; SANTOS, 2021; KOUASSI *et al.*, 2023; ROSA, 2018).

O cenário atual da BHRA é resultado do processo de colonização europeia que ocorreu através da mão de obra gratuita dos colonos a partir da instalação de pequenas propriedades (FERREIRA, 2020). Os incentivos estaduais do pós-guerra (1945-1970) para a produção de carvão na porção noroeste da bacia (LADWIG; SILVA, OLIVEIRA, 2023) e, posteriormente, o Programa Nacional de Uso Racional de Várzeas Irrigadas (PROVÁRZEAS) como incentivo à produção agrícola, acentuou os impactos ambientais. Essas políticas públicas tiveram um impacto notável nas modificações do espaço geográfico da bacia (SILVA, 2021).

Os problemas ambientais causados pela mineração de carvão, desde o início do século passado, também se manifestaram na contaminação do solo, da água e da biota devido à quantidade de poluentes presentes nos resíduos da atividade (PEDROSO-FIDELIS *et al.*, 2020; ZOCHE *et al.*, 2010; ZOCHE *et al.*, 2023). Estudos recentes inferem que os aquíferos aluviais Rio Bonito e Leques, na região carbonífera de Santa Catarina, ainda permanecem contaminados com altos níveis de poluentes devido à mineração de carvão (BELLETTINI, 2019).

Além disso, o cultivo do arroz tem provocado grandes mudanças na paisagem, como a retirada da mata nativa às margens dos rios, o nivelamento dos terrenos para obtenção de campos retangulares e homogêneos e a impermeabilização do solo, modificando o fluxo natural da água e grandes quantidades de produtos químicos com efeitos negativos na recarga de aquíferos (COMASSETTO, 2008; PRESA, 2011; ROSSO, 2007). Hadlich (1997) e Gaidzinski (2001) afirmaram que a água devolvida aos rios compromete a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Atualmente, as maiores áreas de cultivo de arroz irrigado estão localizadas nos municípios integrantes da BHRA, como Meleiro (70,5%), Ermo (66,4%), Forquilha (59,9%), Turvo (59,5%), Nova Veneza (34,1%) e Maracajá (30,5%) (VIBRANS *et al.*, 2021). Chama a atenção o fato de a atividade ainda persistir da mesma forma que no passado, beneficiando-se dos recursos naturais existentes na paisagem.

Na mesma trajetória, e resultante das duas atividades primárias já destacadas, surge a expansão urbana. Tanto a cidade de Criciúma quanto Araranguá atuam como pólos regionais de duas associações de municípios: a Associação de Municípios da Região Carbonífera (AMREC) e a Associação de Municípios do Extremo Sul de Santa Catarina (AMESC). Enquanto a indústria do carvão e a agricultura promoveram mudanças no terço médio e superior da BHRA, a expansão urbana nas últimas décadas ocorreram em diversas áreas, com ligeira concentração em localidades mais próximas do Oceano Atlântico e, portanto, ligadas ao terço médio inferior da bacia. Ladwig, Silva e Oliveira (2023) destacaram a intensificação da urbanização e o crescimento populacional, alavancando a carga antrópica sobre os recursos naturais.

Comparando o censo de 2010 com o último realizado em 2022, dentre os municípios que pertencem à BHRA, Criciúma, Araranguá, Forquilha e Balneário Arroio do Silva foram os que mais tiveram aumento no número de habitantes (IBGE, 2023). O aumento populacional dos municípios de Araranguá e Criciúma, nos últimos anos, é justificado pelo fato de serem consideradas cidades-polo de duas microrregiões. Forquilha também se destacou pelo desenvolvimento do agronegócio, e Balneário Arroio do Silva por abrigar pessoas de outras regiões que se aposentam e optam por adquirir imóveis de segunda moradia. Estudos realizados na região costeira do Sul de Santa Catarina, mostraram crescimento geométrico populacional nas últimas décadas (PEREIRA, 2023), sendo mais significativo em direção aos complexos lagunares e APPs (MARCON; ZOCHE; LADWIG, 2017), levando ao aumento da carga de poluentes nos corpos d'água e danos aos serviços ecossistêmicos.

Em relação à conversão de áreas de pastagens, Ladwig, Silva e Oliveira (2023) afirmaram que essas áreas são dinâmicas e, conseqüentemente, diferentes pressões são exercidas sobre esses espaços. No caso da BHRA, a pecuária e a pesca não são tão representativas quanto a agricultura no avanço dessas áreas (LADWIG; SILVA, OLIVEIRA, 2023). As perdas da classe SIL ocorridas para a classe FNA são convenientes, pois auxiliam na conservação biológica, uma vez que a

silvicultura influencia positivamente a conectividade estrutural da paisagem, principalmente quando apresenta redução dos remanescentes florestais (SCUSSEL *et al.*, 2020). Em relação à cobertura da terra, os resultados do presente estudo são semelhantes aos relatados por Vibrans *et al.* (2021), onde em 2017 a cobertura florestal da BHRA era de aproximadamente 30%.

Embora exista uma área maior destinada à cobertura vegetal na BHRA, ela está concentrada em locais específicos. Uma pequena parcela faz parte de Unidades de Conservação, como a Reserva Biológica Estadual do Aguai, ao norte e o Parque Nacional da Serra Geral, ao sul. Grande parte dos remanescentes de Mata Atlântica ainda existentes na bacia (especialmente aqueles localizados nas encostas das montanhas) estão fora das áreas protegidas (SILVA, 2021). Para Scheibe, Buss e Furtado (2010), a preservação da floresta em áreas de escarpa é relevante, não só pela rica biodiversidade, mas também pela proteção contra processos erosivos e pela regularização dos rios, cujas nascentes estão concentradas nas encostas e percorrem caminhos curtos.

Mudanças na cobertura florestal nativa do bioma Mata Atlântica e sua distribuição espacial aumentaram o isolamento florestal em 36,4% das paisagens (ROSA *et al.*, 2021). Vibrans *et al.* (2013) inferiram que, devido ao processo de exploração madeireira ocorrido desde o início da colonização, a cobertura florestal da Encosta Atlântica de Santa Catarina sofreu simplificação em sua estrutura. Este cenário pode ser observado na planície da bacia, onde os remanescentes de mata nativa são poucos e muito fragmentados.

É possível argumentar que grande parte da degradação ambiental na área analisada é consequência da exploração predatória ocorrida no passado e, em alguns casos, ainda ocorre, impactando negativamente o meio ambiente. Em essência, vale a pena mencionar a expansão urbana, a agricultura e a mineração de carvão como os principais agentes atuais de degradação ambiental na BHRA. Compreender os agentes que modificam o espaço é necessário e indispensável para o planejamento e gestão ambiental do território (RODRIGUES; MEDEIROS, 2022). Por outro lado, a democracia participativa direta ainda apresenta falhas dada a baixa preocupação da população com as questões ambientais (HAMMES *et al.*, 2022).

5. Considerações finais

Os métodos de classificação adotados permitiram identificar as principais alterações na paisagem da BHRA decorrentes das atividades humanas. A metodologia aplicada para classificar a cobertura e uso da terra usando dados abertos e disponíveis gratuitamente, se mostrou suficientemente robusta para detectar mudanças ao longo de sete anos, especialmente em áreas com vegetação florestal nativa densa e herbácea. A validação e acurácia das classificações, bem como dos mapas gerados a partir da utilização de árvores de decisão baseadas em pixels, mostraram eficiência e atenderam aos objetivos do presente estudo.

As alterações atuais detectadas são sucintas, pois as modificações mais relevantes na dinâmica da paisagem foram observadas em décadas passadas, onde as questões ambientais não foram observadas. Essa condição sinaliza a aceitação da pesquisa científica pelos gestores, que a tomam como subsídio lógico na tomada de decisão, bem como o processo de adequação à legislação ambiental, onde, através dos órgãos ambientais, é possível colocar em prática a conservação e preservação dos recursos naturais. Os resultados aqui obtidos podem ser úteis aos formuladores de políticas públicas e tomadores de decisão, no que diz respeito ao planejamento ambiental do território, visando o desenvolvimento sustentável.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Fundo Estadual de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação Superior (FUMDES) de Santa Catarina, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, e do Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental – PROCAM, onde José Alberto Quintanilha e Carlos Henrique Grohmann são bolsistas de produtividade do CNPq (procs. 305188/2020-8 e 311209/2021-1).

Referências

- Altieri, M. A. *Agroecologia: a dinâmica produtiva da agricultura sustentável*. 3. ed. Porto Alegre: Ed. Da Universidade FRGS, 2001.
- Alvares, C.A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

- Araújo, M. C. F.; Meneses, P. R.; Sano, E. E. Sistema e classificação de uso e cobertura da terra com base na análise de imagens de satélite. *Revista Brasileira De Cartografia*, v. 59 (2), 2009. <https://doi.org/10.14393/rbcv59n2-44902>
- Back, A. J. *Informações climáticas e hidrológicas dos municípios catarinenses (com programa HidroClimaSC)*. Florianópolis: Epagri, 2020.
- BELLETTINI, A. S. *Avaliação da contaminação proveniente da mineração de carvão nas águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do rio Araranguá – SC*, 2009. 65f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2009. <http://hdl.handle.net/10183/224067>
- Brasil. *Decreto nº 86.146, de 23 de junho de 1981*. Dispõe sobre a criação do Programa Nacional para Aproveitamento de Várzeas Irrigáveis - PROVÁRZEAS NACIONAL. Brasília, DF: Presidência da República, 1981. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=86146&ano=1981&ato=c15UzaU90MrRVTed1>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- Campos, S. N. *Uma biografia com um pouco de história do carvão catarinense*. Florianópolis: Insular, 263 p., 2001.
- Carvalho, W. S; Filho, F. J. C. M.; Santos, T. L. Uso e cobertura do solo utilizando a Plataforma Google Earth Engine (GEE): Estudo de caso em uma Unidade de Conservação. *Brazilian Journal of Development*, v. 7 (2), 15280 – 15300, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-243>
- COMASSETTO, V. *Água, meio ambiente e desenvolvimento na bacia do Araranguá (SC)*, 2008. 339f. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2008. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91353>
- Conterato, M. A. *Estudo da ação antrópica sobre o meio ambiente em área de produção familiar na Bacia Hidrográfica do rio Ibicuí/RS - uma aplicação do zoneamento na perspectiva do desenvolvimento ambiental* Boletim Gaúcho de Geografia, v. 26, 226 – 231, 2000.
- Dall’Alba, J. A. *História do grande Araranguá, SC*. Gráfica Orion Editora, 519 p., 1997.
- ESA - European Space Agency. *Sentinel-2 user handbook*. 1.ed. Darmstadt: ESA, 64 p., 2015.
- Drusch, M. *et al.* Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of Environment*, 120, 25-36, 2012.
- Ferreira, L. M. S. Estrutura fundiária e concentração da propriedade da terra na colônia de imigrantes Dona Francisca (Joinville), Santa Catarina, 1850-1920. *Estudos Econômicos* (São Paulo), v. 50 (3), p. 485 – 512, 2020. <https://doi.org/10.1590/0101-41615034lmsf>
- Ferreira, A. T. S. *et al.* Coastal Dynamics Analysis Based on Orbital Remote Sensing Big Data and Multivariate Statistical Models. *Coasts*, 3 (3), 160-174, 2023. <https://doi.org/10.3390/coasts3030010>
- Florenzano, T. G. *Imagens de satélite para estudos ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 97 p., 2002.
- Gonzalez, R. C.; Woods, R. E.; Eddins, S. L. *Digital Image Processing Using MATLAB®*. Pearson Education Inc., 2009.
- Gorelick, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18 – 27, 2017.

- Hammes, H. F. *et al.* Impressions of public opinion on environmental licensing and popular participation in decisions regarding the design and implementation of public management practices. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, v. 57 (4), p. 555 – 569, 2022.
- Hobold, P. *A história de Araranguá: reminiscências desde os primórdios até o ano de 1930*. Porto Alegre: Palmarinca, 255 p., 1994.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo populacional de 2022*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>
Acesso em: 15 ago. 2023.
- Jiang, Z. *et al.* Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, v. 112 (10), 3833-3845, 2008.
- Klein, R. M. *Mapa fitogeográfico do Estado de Santa Catarina*. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 1978.
- Kouassi, C. J. A. *et al.* Google Earth Engine for Landsat image processing and assessing LULC classification in southwestern Côte D'ivoire. *Geodesy and Cartography*, v. 49 (1), p. 37 – 50, 2023. <https://doi.org/10.3846/gac.2023.16805>
- Krebs, A. S. J. *Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC*, 2004. 375f. Tese (Doutorado em Geografia). Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2004. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87645>
- Krebs, A. S. J.; Alexandre, N. Z. Recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Araranguá - SC: disponibilidade e conflitos. *Águas Subterrâneas* (São Paulo, Brazil), 2000.
- Ladwig, N. I.; Silva, J. G. S.; Oliveira, A. J. M. *Alteração Antrópica nas Bacias Hidrográficas do Rio Araranguá e Urussanga*. São Carlos: Pedro & João Editores, 2023, 200 p. DOI: 10.51795/9786526507117
- Marcon, L., Zocche, J., & Ladwig, N. O crescimento e espalhamento urbano da cidade de Araranguá, estado de Santa Catarina, de 1957 a 2010 e as consequências ambientais. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais* (Online), v. 43, 32 – 48, 2017. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820170078>
- Martins S. F.S. *et al.* Processamento Digital de Imagens para Mapeamento de Uso e Cobertura da Terra: Uma Revisão de Literatura. *Rev. Geociênc. Nordeste*, Caicó, v.9, n.2, (Jul-Dez) p.131-143, 2023.
- Pedroso-Fidelis, G.S. *et al.* Pulmonary oxidative stress in wild bats exposed to coal dust: a model to evaluate the impact of coal mining on health. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 191, p. 110211, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110211>
- Pereira, J. R. *Sustentabilidade socioambiental das lagoas costeiras no sul do estado de Santa Catarina*, 2023. 153f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma-SC, 2023.
- PERHSC. Plano estadual de recursos hídricos de Santa Catarina. *Caracterização geral das regiões hidrográficas de Santa Catarina*. RH10 – Extremo Sul Catarinense, 2017.
- Presa, J. B. “*O arroz no espigão e o milho no banhado*”: programa Provárzeas – O desenvolvimento de uma política pública e o cultivo do arroz em municípios da bacia do rio Araranguá, 2011. 195f. Dissertação (Mestrado em História). Programa de Pós-Graduação em História, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2011. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/95384>
- Rodrigues, J. P. B; Medeiros, W. D. A. Uso e ocupação do solo no município de Mossoró/RN (1998-2018). *Rev. Geociênc. Nordeste*, Caicó, v.8, n.2, (Jul-Dez) p.1-12, 2022.

- Rosa, M. R. *et al.* Hidden destruction of older forests threatens Brazil's Atlantic Forest and challenges restoration programs. *Science advances*, v. 7 (4), p. 1 – 8, 2021.
- Rosa, M. R. Classificação do padrão de ocupação urbana de São Paulo utilizando aprendizagem de máquina e Sentinel 2. *Revista do Departamento de Geografia*, 15 – 21, 2018.
- Rosso, J. C. *Avaliação do Consumo de Água em Lavoura de Arroz Irrigado no Sistema Pré-Germinado nas Condições Climáticas do Sul*. 2007, 64f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma-SC, 2007.
- Santa Catarina. *Lei n. 10.949, de 09 de novembro de 1998*. Dispõe sobre a caracterização do Estado em 10 (dez) Regiões Hidrográficas. Florianópolis, SC, 1998. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Legislacao/Lei-Estadual-10949-1998.pdf. Acesso em: 23 ago. 2023.
- Scheibe, L. F. (Org.); Buss, M. D.; Furtado, S. M. A. Atlas Ambiental Bacia do Rio Araranguá: Santa Catarina - Brasil. Florianópolis: Ed. UFSC: Cidade futura, 2010, 64 p.
- Scussel, C. *et al.* Fragmentação florestal em área de Mata Atlântica no sul do Brasil: uma análise baseada em métricas da paisagem. *Geografia, Ensino & Pesquisa*. vol. 24 (45), 2020. <https://doi.org/10.5902/2236499443836>
- Silva, J. G. S. *Cobertura e uso da terra na Bacia Hidrográfica do rio Araranguá, Santa Catarina, Brasil*, 2021. 164f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma-SC, 2021. <http://repositorio.unesc.net/handle/1/9103>
- Silva, J. G. S. *et al.* Aplicação de protocolo de avaliação rápida da integridade ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, SC. *Boletim Paulista de Geografia*, v. 109 (1), p. 147 – 171, 2023.
- Stehman, S. V.; Foody, G. M. Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. *Remote Sensing of Environment*, v. 231, 111199, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.018>
- Vibrans, A. C. *et al.* *Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina: Floresta Ombrófila Densa*. Blumenau: Edifurb, 2013.
- Vibrans, A. C. *et al.* MonitoraSC: um novo mapa de cobertura florestal e uso da terra do estado de Santa Catarina. *Agropecuária Catarinense*, v. 34 (2), p. 42-48, 2021.
- Vogel, H. F.; Zawadzki, C. H.; Metri, R. Florestas ripárias: importância e principais ameaças. *SaBios-Revista de Saúde e Biologia*, v. 4 (1), 2009. <https://revista2.grupointegrado.br/revista/index.php/sabios/article/view/143>
- Xu, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int J Remote Sens*, 27:3025–3033, 2006.
- Zha, Y.; Gao, J.; & Ni, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24 (3), p. 583 – 594, 2003.
- Zocche, J.J. *et al.* Heavy metals and DNA damage in blood cells of insectivores bats in coal mining areas of Catarinense coal basin, Brazil. *Environ. Res.* v. 110, 684–691, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.06.003>
- Zocche, J.J. *et al.* Technosols in coal mining areas: Viability of combined use of agroindustry waste and synthetic gypsum in the restoration of areas degraded. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 13, p. 100618, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100618>