

VI

WORKSHOP

PPGF

Trabalhos Completos Selecionados

Comemoração do Dia d@ Geógraf@

29 de maio de 2023

**Programa de Pós-Graduação em Geografia Física
Departamento de Geografia
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas
Universidade de São Paulo**



fflch

USP



Universidade de São Paulo

Reitor

Carlos Gilberto Carlotti Junior

Vice-Reitora

Maria Armanda do Nascimento Arruda



Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas

Diretor

Paulo Martins

Vice-Diretora

Ana Paula Torres Megiani

ISBN 978-85-7506-493-1

Bianca Carvalho Vieira (Org.)

VI WORKSHOP
do Programa de Pós-Graduação em
Geografia Física – PPGF

São Paulo
2023



fflch

FACULDADE DE FILOSOFIA,
LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

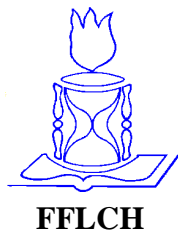
Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo
Charles Pereira Campos – CRB-8/8057

W926 Workshop PPGF (6., 2023: São Paulo, SP).
Anais [do] 6º Workshop Programa de Pós-Graduação em Geografia Física -
PPGF [recurso eletrônico]: Comemoração do Dia d@ Geógraf@, 29 de maio de
2023 / Comissão organizadora: Bianca Carvalho Vieira ... [et al.]. -- São Paulo:
Departamento de Geografia FFLCH/USP, 2023. 6.700 Kb; PDF.

ISBN 978-85-7506-493-1

1. Geografia Física - (Congressos). 2. Pós-graduação. 3. Cartografia. Título.
II. VI Workshop PPGF

CDD 060.9181



Universidade de São Paulo
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas
Departamento de Geografia
Programa de Pós Graduação em Geografia Física



CORPO DOCENTE

Alfredo Pereira de Queiroz Filho

Antonio Carlos Colângelo

Bianca Carvalho Vieira

Célia Regina de Gouveia Souza

Cleide Rodrigues

Déborah de Oliveira

Emerson Galvani

Fernando Nadal Junqueira Villela

Fernando Shinji Kawakubo

Gabriel Pereira

Jurandyr Luciano Sanches Ross

Ligia Vizeu Barrozo

Luis Antonio Bittar Venturi

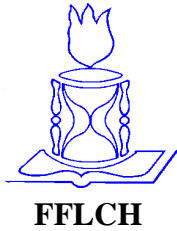
Marcos Roberto Pinheiro

Maria Elisa Siqueira Silva

Sheila Aparecida Correia Furquim

Sidneide Manfredini

Sueli Angelo Furlan



Universidade de São Paulo
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas
Departamento de Geografia
Programa de Pós Graduação em Geografia Física



COLABORADORES

André Mateus Barreiros

Daniel Richard Hirmas

Marcelo Reis Nakashima

Paola Cianfarra

REPRESENTANTES DISCENTES

Eduardo Félix Justiniano

Marco Antonio Martins

Marina Tamaki de Oliveira Sugiyama

Réginal Exavier

ESTAGIÁRIOS

Guilherme D'Alessandro Gonçalves Maglione

Karina Santos Goes

Pedro Campos Francisco

SECRETARIA DE PÓS-GRADUAÇÃO

José Fermino da Silva

Rosângela Fidalgo Garcez

SUMÁRIO

ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA MAPEAMENTO AUTOMÁTICO DE CAFÉ COM IMAGENS LANDSAT	6
Introdução	8
Material e Métodos	9
Resultados e Discussões.....	15
Considerações Finais	17
Referências.....	18
ANÁLISE DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE HUMANA AO FOGO NOS MUNICÍPIOS DA AMAZÔNIA LEGAL QUE MAIS QUEIMARAM ENTRE 2010- 2020.....	21
Introdução	23
Materiais e Métodos	24
Resultados e Discussões.....	25
Considerações finais	30
Referências.....	30
AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NASDEM E COPDEM PARA O MAPEAMENTO DA COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA BACIA DO RIO URUBU (MÉDIO ARAGUAIA), TOCANTINS/BRASIL	33
Introdução	35
Material e Métodos	35
Resultados e Discussões.....	36
Considerações Finais.....	38
Referências.....	39
CARTOGRAFIA MORFOLÓGICA DE DETALHE APLICADA AO ESTUDO DA MORFOGÊNESE DE FEIÇÕES RUGOSAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO DO QUILOMBO, SÃO BENTO DO SAPUCAÍ/SP	40
Introdução	42
Material e Métodos	43
Resultados e Discussões.....	44
Considerações Finais.....	49
Referências.....	49

INFLUÊNCIAS NEOTECTÔNICAS NA FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DO DELTA BREVES/BOIUÇU, SUDOESTE DA ILHA DE MARAJÓ – PA.....	52
Introdução	54
Material e Métodos	58
Resultados e Discussões.....	59
Considerações Finais.....	67
Referências.....	67
MAPA MORFOLÓGICO DE ÁREA AMOSTRAL - PENÍNSULA FILDES, ILHA REI GEORGE, PENÍNSULA ANTÁRTICA.....	71
Introdução	73
Material e Métodos	74
Resultados e Discussões.....	75
Considerações Finais.....	79
Referências.....	80
MAPEAMENTO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA RESTAURAÇÃO FLORESTAL NAS BACIAS PCJ (PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ).....	81
Introdução	83
Material e Métodos	87
Resultados e Discussões.....	97
Considerações Finais	100
Referências	101

Linha de Pesquisa: Informação Geográfica: tratamento, representação e análise

**ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA
MAPEAMENTO AUTOMÁTICO DE CAFÉ COM IMAGENS LANDSAT**

Maria Cecilia Manoel¹, Marcos Reis Rosa¹, Alfredo Pereira de Queiroz¹.

¹Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia

maria.manoel@usp.br

Resumo

A pesquisa avaliou a influência da produção bienal no mapeamento do café arábica com a classificação de imagens de satélite em duas escalas de análise. A plataforma *Google Earth Engine* (GEE), o algoritmo de aprendizado de máquina (AM) Random Forest (RF) e as imagens do Landsat 8, de 2013 a 2021, foram utilizadas para analisar as influências da bienalidade (alta e baixa produção) e da sazonalidade (período úmido e seco) dos cafezais. Foram definidas sete classes de uso da terra (água, área urbana, vegetação, café, área agrícola, pasto antrópico e eucalipto) para duas áreas de estudo: Região Média Mogiana e município de Espírito Santo do Pinhal, localizadas no estado de São Paulo. Observou-se que o RF e as imagens Landsat 8 produziram bons resultados na classificação de áreas agrícolas e considerável capacidade de discriminação das sete classes de uso da terra. Foi possível distinguir as respostas espectrais do café, do eucalipto e das vegetações arbóreas. Os resultados revelaram que os acertos da classificação dos períodos bienais do café foram de 70%, na Média Mogiana e, de 73%, na escala municipal.

Palavras-chave: *Café; Google Earth Engine; Aprendizado de Máquina.*

Research Line: Geographic Information: treatment, representation and analysis

**MACHINE LEARNING ALGORITHM FOR
AUTOMATIC MAPPING OF COFFEE WITH LANDSAT IMAGES**

Maria Cecília Manoel¹, Marcos Reis Rosa¹, Alfredo Pereira de Queiroz¹.

¹University of Sao Paulo, Department of Geography

maria.manoel@usp.br

Abstract

The research evaluated the influence of biennial production on the mapping of Arabica coffee by classifying satellite images into two analysis scales. The Google Earth Engine (GEE) platform, the Random Forest (RF) machine learning algorithm (ML) and Landsat 8 images, from 2013 to 2021, were used to analyze the influences of bienniality (high and low production) and seasonality (wet and dry period) of coffee plantations. Seven classes of land use were defined (water, urban area, vegetation, coffee, agricultural area, anthropogenic pasture and eucalyptus) for two study areas: Médio Mogiana Region and the municipality of Espírito Santo do Pinhal, located in the state of São Paulo. It was observed that the RF and Landsat 8 images produced good results in the classification of agricultural areas and considerable capacity for discrimination of the seven land use classes. It was possible to distinguish the spectral responses of coffee, eucalyptus and tree vegetation. The results revealed that the accuracy of the classification of the biennial coffee periods was 70%, on the Mogian Average, and 73%, on the municipal scale.

Key-words: *Coffee; Google Earth Engine; Machine Learning.*

Introdução

Os avanços tecnológicos vinculados às informações espaciais estão mudando as formas de produção cartográfica, bem como os modos de armazenar, analisar, organizar e compartilhar mapas. A constante evolução de softwares, dos Sistemas de Informações Geográficas e do Sensoriamento Remoto permite a atualização rápida dos dados, incorpora uma diversidade maior de informações e, conseqüentemente, amplia as possibilidades das análises espaciais (HUNT et al., 2020; TAMIMINIA et al., 2020).

Os Sistemas de Informações Geográficas possuem um papel relevante na elaboração e processamento de dados cartográficos. Contudo, o uso de recursos que envolvem a inteligência artificial tem se destacado, principalmente na produção de mapeamentos em série. Os produtos e serviços que demandam o desenvolvimento de soluções com linguagem de programação são cada vez mais requisitados. As geotecnologias estão mais integradas e proporcionam uma ampla gama de opções para atender às soluções que, antes, eram consideradas inviáveis, tais como o processamento de um grande volume de imagens de determinado período ou de uma extensa área de estudo (TAMIMINIA et al., 2020).

Existem, hoje, diversas plataformas de processamento de dados em nuvem. As mais relevantes são: Amazon Web Services (AWS), disponível desde 2006; Azure (Microsoft), cuja operação se iniciou em 2010; e Google Earth Engine (GEE), lançado em 2010. Essas plataformas têm em comum o acesso aos dados espaciais de diversos sensores, à Inteligência Artificial (AI) e a um conjunto de algoritmos de Aprendizado de Máquina (AM) (AMANI et al., 2020; TAMIMINIA et al., 2020).

Segundo Chen e Zhao (2022), o número de pesquisas sobre o GEE aumentou tanto que pode ser considerada a plataforma de processamento em nuvem mais popular do mundo. Essas pesquisas são de diversas áreas de conhecimento, com destaque para os estudos urbanos, hídricos, ambientais e agrícolas (ALONSO et al., 2016; DEINES et al., 2019; HUANG et al., 2021; CHEN e ZHAO, 2022). Na temática agrícola, as pesquisas com o GEE incluem temas como o mapeamento de cultivos, produtividade, monitoramento e disseminação de pragas (KUMAR e MUTANGA, 2018). Nesta pesquisa, o GEE foi utilizado no mapeamento do café arábica no interior de São Paulo, em duas escalas de análise da região da Média Mogiana.

As imagens do Landsat 8 e o Random Forest foram adotados na classificação supervisionada de sete classes de uso da terra (água, área urbana, vegetação, café, área agrícola, pasto antrópico e eucalipto), visando entender quais as influências das fases fenológicas do café (bienalidade) na classificação das imagens de satélite.

Material e Métodos

I. A fenologia e a bienalidade do café

Há inúmeras espécies de café. As duas de maior destaque são: *coffea arabica* (arábica), que corresponde a mais de dois terços da produção mundial, e *coffea canephora* (conilon e robusta). Essas duas espécies representam, atualmente, cerca de 95% do café consumido no mundo. Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Café (ABIC, 2023), o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café e o segundo maior consumidor da bebida.

Para realizar o mapeamento dos cafezais com qualidade, é imprescindível conhecer sua fenologia, hábitos de crescimento e desenvolvimento da planta ao longo do seu ciclo de vida. Sua produtividade pode ser influenciada por fatores externos, como a temperatura e a umidade, e por fatores internos, como o genótipo. De acordo com CONAB (2023), a produção do café tipo arábica, cultivado em pleno sol, ocorre em períodos bienais (bienalidade negativa e de bienalidade positiva). A bienalidade indica os períodos cíclicos de desenvolvimento da planta, que começa em setembro e termina em agosto. Os anos de bienalidade negativa são associados ao início da primeira fase fenológica, em anos ímpares (ano 01) e, a bienalidade positiva, ao início do segundo ano fenológico, em anos pares (ano 02) (Figura 1).



Figura 1. Esquema fenológico do cafeeiro arábica. Fonte: Espresso (2022).

A planta produz respostas espectrais diferentes nas imagens de satélite nas duas fases fenológicas (Figura 1). No primeiro ano fenológico (bienalidade negativa) há concentração de folhas e, no segundo (bienalidade positiva), há aparecimento de flores e frutos.

II. Mapeamento de café no GEE e o uso de AM

As primeiras publicações brasileiras sobre o mapeamento de café com sensoriamento remoto são da década de 1990. Até então, segundo Tardin et al. (1992), não existiam estudos de classificação de imagens desse cultivo. Os autores utilizaram as bandas 3, 4 e 5 do Landsat e o algoritmo de máxima verossimilhança. Os resultados mostraram seu potencial, pois conseguiram diferenciar as áreas de café dos plantios de citrus e cana-de-açúcar.

O uso de técnicas de classificação de imagens para mapear os cafezais se tornou mais frequente nos anos 2000, provável decorrência da popularização do uso de recursos computacionais e da internet. O aumento da disponibilidade, do acesso e da utilização de satélites de alta resolução (GeoEye, Ikonos e Quickbird) também impulsionaram a detecção e mapeamento de áreas de café.

O Google Earth Engine (GEE) pode ser considerado um extraordinário recurso de sensoriamento remoto e de processamento de imagens, em escala global, que disponibiliza serviços de aprendizagem de máquina e imagens de diversos satélites e sensores (TAMIMINIA et al., 2020).

O GEE possui uma interface de programação de algoritmos para processamento (APIs) e de desenvolvimento de rotinas em linguagem JavaScript e Python. Esse ambiente facilitou o uso de imagens de satélite e possibilitou a evolução de pesquisas de sensoriamento remoto (TAMIMINIA et al., 2020). Hansen et al. (2013) demonstraram esse potencial ao realizarem o mapeamento da cobertura vegetal do mundo, de 2000 a 2012. O processamento de mais de 600 mil imagens Landsat, cerca de 700 terabytes, durou 100 horas no GEE. Estima-se que esse processamento, em um único computador, utilizaria aproximadamente um milhão de horas.

O Aprendizado de Máquina (AM) é um método de análise de dados que automatiza modelos por meio de inteligência artificial. Algoritmos de AM são utilizados por programadores de software há anos, porém o uso para as análises espaciais foi progressivamente popularizado e viabilizado pelo GEE. Essa plataforma possibilita os processamentos dos chamados geo-big datas, dados espaciais de diferentes fontes, mas que tem em comum o fato de serem arquivos extensos e volumosos (TAMIMINIA et al., 2020).

O GEE possui diversos algoritmos de AM. Nesta pesquisa, optou-se pelo Random Forest (RF), também conhecido como árvore de decisão. Essa função é baseada na coleta de amostras utilizadas para o treinamento. Após a definição de classes e amostras, o algoritmo Random Forest é aplicado como um classificador supervisionado. Para garantir uma classificação de qualidade, parte das amostras deve ser utilizada no treinamento das árvores de decisão, enquanto o restante deve ser utilizado no próprio classificador para uma validação cruzada, para avaliar o resultado do modelo (BREIMAN, 2001).

III. Landsat 8

O programa Landsat lançou seu primeiro satélite em 1970. E ao longo dos anos, diversas missões foram colocadas em órbita. Nessa pesquisa, foram usadas as imagens do

Landsat 8, inicialmente conhecido como LDCM (Landsat Data Continuity Mission), lançado em 2013. Segundo USGS (2022), o primeiro Landsat do século 21 foi aprimorado com dois novos instrumentos: OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor). De acordo com NASA (2022), o Landsat 8 possui resolução espacial de 15 metros na banda Pancromática, 30 metros nas bandas Multiespectrais e 100 metros nas bandas termais. O satélite tem capacidade de imagear uma faixa terrestre de 185 km e o período de revisita é de 16 dias.

IV. Área de estudo

A pesquisa investigou duas áreas de estudo em escala distintas: a Região Média Mogiana ($\cong 13.500\text{km}^2$) e o município de Espírito Santo do Pinhal ($\cong 457\text{km}^2$), como ilustra a Figura 2.

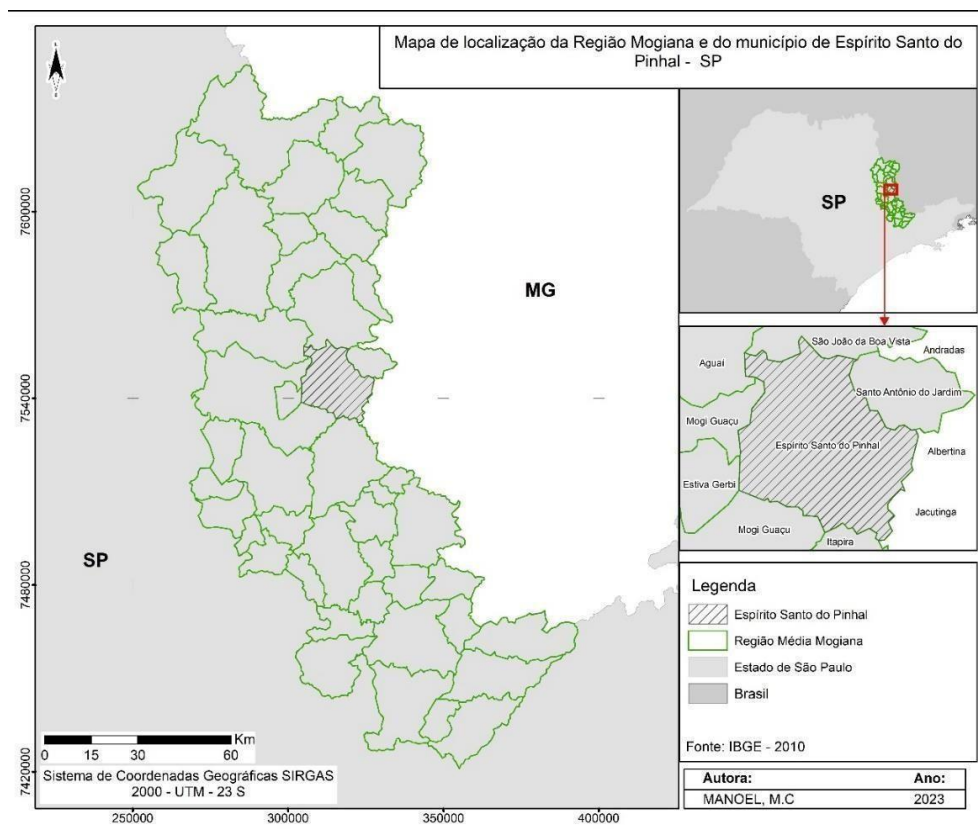


Figura 2. Mapa de localização das áreas de estudo. Fonte: IBGE (2010).

Segundo dados do CIIAGRO (2022), a região é apta à cultura e produção de café, com temperaturas médias mensais entre 18°C e 24°C, e média anual de 21,6°C. A precipitação anual média é de 1.378 mm, com uma estação chuvosa, de outubro a março, e uma estação seca, de abril a setembro. A região apresenta altitudes relativamente elevadas (entre 800 e 1.400m), que favorece o desenvolvimento do café e contribui para torná-lo produtivo e de alta qualidade (CAMARGO e CAMARGO, 2001).

V. Etapas metodológicas

O mapeamento das áreas de café com imagens de satélite tem sido uma tarefa desafiadora, principalmente pela composição arbórea e perene do cultivo, assim como as características físicas da área de estudo.

Considerando a similaridade das respostas espectrais dos cafeeiros com outros cultivos e usos (MOREIRA et al., 2004; MARTINEZ-VERDUZCO et al., 2012; ORTEGA-HUERTA et al., 2012), a definição de classes de uso da terra é uma etapa muito importante. Sete classes de uso foram definidas na classificação dos mosaicos de imagens: água, área urbana, vegetação, café, área agrícola, pasto antrópico e eucalipto.

Para validar as classes, assim como avaliar a classe específica de café, foi utilizado o método de acurácia baseado em Olofsson et al. (2014). Essa abordagem considera o desenho da amostragem e a análise da resposta espectral para correlacionar as amostras e as áreas, e estabelecer um índice de precisão por meio de uma matriz de erro. Os resultados mostram a acurácia da classificação por classe mapeada. Eventualmente, segundo os autores, também é importante rever as amostras de classificação e as estimativas de acurácia, para refinar os resultados do processamento das imagens.

Foram coletadas amostras (polígonos) de todas as sete classes. Para avaliar a acurácia, 70% dos polígonos foram separados para o sorteio dos pontos de treinamento e 30% foram utilizados para o sorteio de pontos aleatórios. Para garantir o processo randômico, as amostras foram embaralhadas nas etapas de validação e treinamento, proporcionando maior independência ao procedimento.

A síntese das atividades da pesquisa pode ser observada na Figura 3. As imagens foram selecionadas entre os anos de 2013 e 2021. Essas imagens são do Landsat 8 Collection2 Tier 1 TOA Reflectance (calibradas). O processamento das imagens é o mesmo para todos os anos: correções de escala, de reflectância e radiométricas, bem como a aplicação de filtro de máscara de nuvens. Essas etapas foram feitas com o auxílio de funções pré-existentes dentro do GEE. Além disso, as imagens passaram por um processo de seleção: filtragem de cobertura de nuvem (<50%); organização por data ou período, considerando a sazonalidade e a bienalidade; e o recorte da área de estudo.

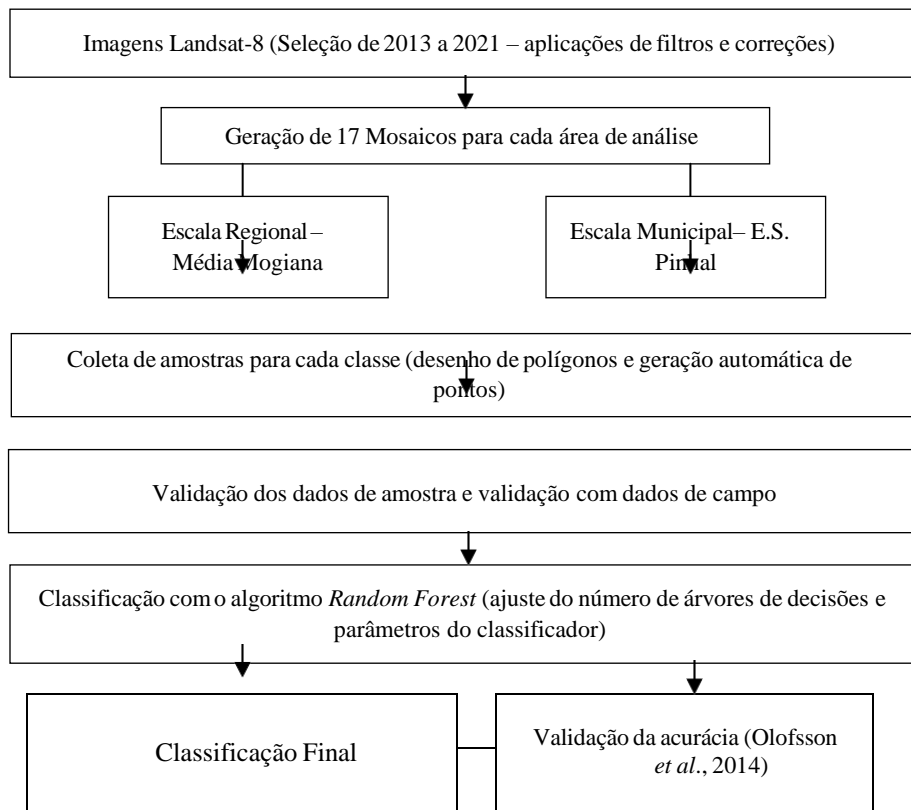


Figura 3. Fluxograma com a descrição das etapas. Fonte: Adaptado de Kelley et al. (2018).

Foram definidos mosaicos compostos por: bandas das imagens, informações de brilho, verdor e umidade (Tasseled Cap – KT), elevação, declividade e aspecto (derivadas do SRTM) e índices de correlação de NDVI e chuva. Os mosaicos de imagens (34) foram agrupados conforme os ciclos bienais, de acordo com a fenologia do café.

Na classificação supervisionada, foram definidas 60 árvores de decisão no RF. Esse número de variáveis seguiu o padrão da raiz quadrada do número de amostras (cerca de 1.000). Acima do valor escolhido, o processamento se tornou lento e pouco eficiente na melhoria da acurácia.

Resultados e Discussões

Os resultados indicam que o uso do RF e das imagens Landsat 8 para fins agrícolas produziram bons resultados em termos de distinção entre as sete classes de uso da terra. Para a classe do café, foi possível distinguir sua resposta espectral do eucalipto e das vegetações arbóreas.

Os acertos da classificação do café melhoraram em situações específicas. Na região Mogiana destacaram-se: 1) Mosaico Sazonal (período úmido/seco) com informações do SRTM; e 2) Mosaico Ano Biental 01 com informações do SRTM, ambos com acertos próximos à 70% na classificação do café. No município, os destaques foram: 1) Mosaico Biental; e 2) Mosaico Biental (úmido), com acertos próximos a 73% na classe café. A Figura 4 mostra a classificação resultante.

Ao comparar os mapas, observou-se que a Região da Média Mogiana apresentou um número mais expressivo de omissão na classificação das áreas de café, ou seja, o mapeamento ficou aquém do esperado apesar dos acertos obtidos. Esse dado revela que é necessário melhorar a distribuição dos pontos de coleta de amostras ao longo dessa área, para aprimorar as classificações futuras.

Na escala do município, no Mosaico Biental úmido, outros usos da terra foram classificados erroneamente como café, mais especificamente as áreas de vegetação. Na comparação entre as escalas, os resultados foram melhores na municipal, com menos erros e confusões espectrais. Tal fato pode ser associado à distribuição das amostras, que ficaram concentradas no município, dada a maior incidência de plantações de café.

Pode-se afirmar que a bienalidade, em ambas as escalas, melhorou a classificação do uso da terra. Outro fator relevante foi o acréscimo de informações do terreno (SRTM), que também contribuiu na qualidade da classificação.

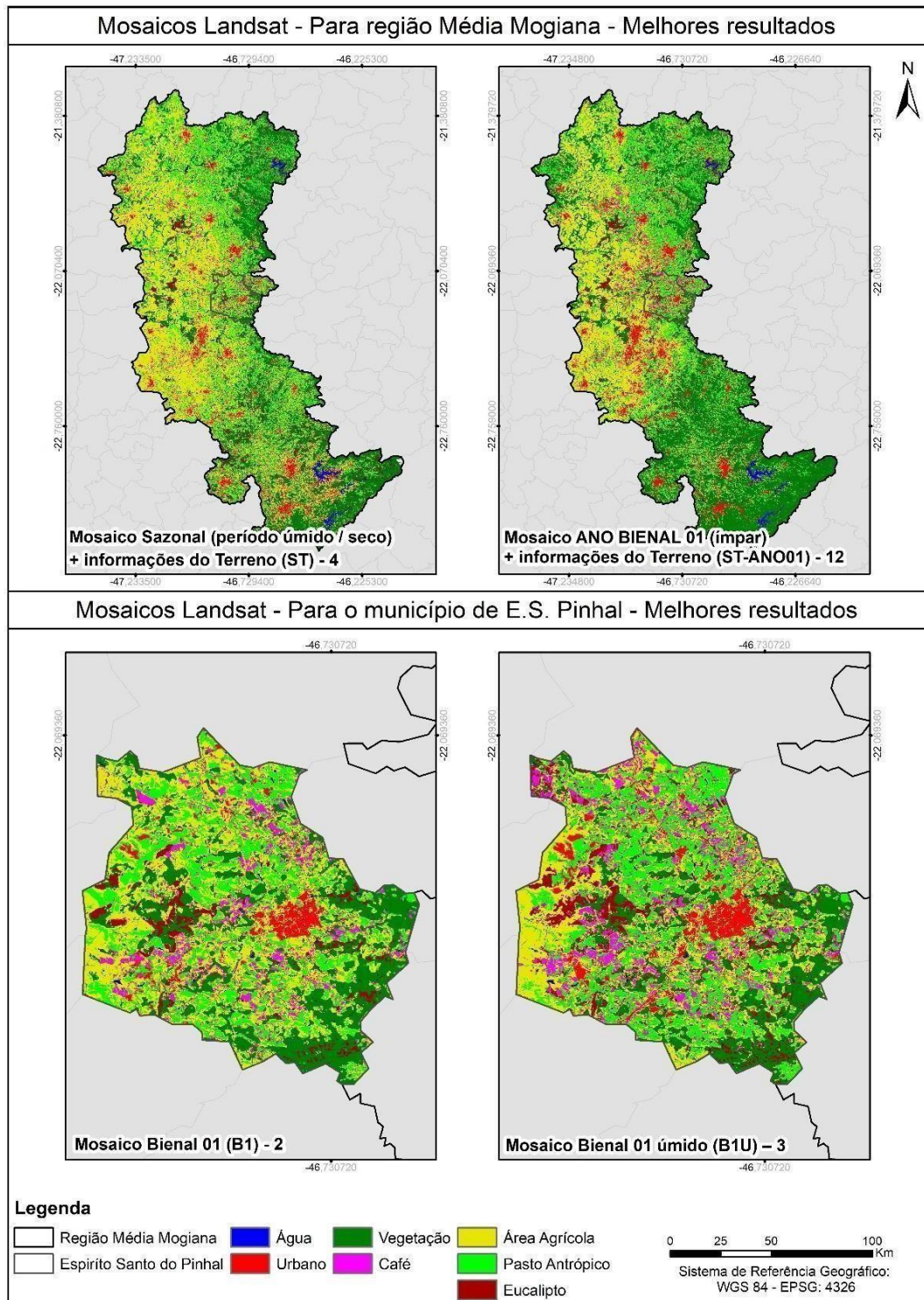


Figura 4. Melhores resultados da classificação das áreas de estudo.

As principais limitações da pesquisa estão relacionadas às confusões espectrais entre as classes de uso da terra. As áreas de café podado ou café em estágio inicial de desenvolvimento também apresentaram erros de classificação. Em estudos anteriores, a utilização de outros índices auxiliou nessa diferenciação, considerando solos expostos e plantios de café, tal como o

Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e NDVI (HUNT et al., 2020; MASKELL et al., 2021; TAMIMINIA et al., 2020).

Conforme Kawakubo e Machado (2016) e Maskell et al. (2021), além da escolha das classes de uso da terra, observar os estágios de crescimento dos cafezais também contribui para diferenciar as respostas espectrais do café e reduzir as confusões com outros componentes da classificação.

De acordo com Kelley et al. (2018), a sazonalidade contribui para distinguir as classes de uso da terra, como a vegetação e outros cultivos temporários. A bienalidade também ajudou a diferenciar os cafeeiros das outras classes. O uso do Tasseled Cap (KT) e de informações do terreno (elevação, declividade e aspecto) do SRTM, foram relevantes para distinguir o café em relação às classes de vegetação.

O uso do classificador RF se mostrou eficiente na classificação do café. Quando associado ao processamento em nuvem, apenas um código (Javascript) possibilitou a geração de classificações em série, elevando o nível de automatização e replicação da pesquisa.

Assim como os estudos anteriores, o uso de mosaicos multitemporais para a classificação e a integração de imagens com distintas informações de entrada, como índices espectrais e topografia se mostraram procedimentos muito importantes (CHEMURA e MUTANGA, 2017; LIU et al., 2020). A utilização de imagens Landsat 8, associadas às informações de Tasseled Cap e dados SRTM foram consideradas como combinações adequadas para o mapeamento de áreas de café.

Considerações Finais

A pesquisa investigou o uso do GEE no mapeamento do café arábica em duas áreas de estudo da região nordeste do Estado de São Paulo. Buscou verificar a influência das duas fases fenológicas do café (bienalidade) na classificação das imagens de satélite.

Observou-se que o RF e as imagens Landsat 8 produziram bons resultados na classificação de áreas agrícolas e boa capacidade de discriminação das sete classes de uso da terra. Foi possível distinguir as respostas espectrais do café, do eucalipto e das vegetações arbóreas.

Os resultados mostraram que a classificação do café melhorou em duas situações, em cada uma das escalas de análise. Na maior extensão territorial, região Mogiana, os maiores acertos na classificação do café aconteceram no: 1) Mosaico Sazonal (período úmido/seco) com informações do SRTM; e 2) Mosaico Ano Bienal 01 com informações do SRTM, ambos com

acertos próximos a 70%. No município de Espírito Santo do Pinhal, os destaques foram: 1) Mosaico Bienal; e 2) Mosaico Bienal (úmido), com acertos próximos a 73% na classe café.

Considera-se também que a integração das geotecnologias viabilizou a execução da pesquisa. A plataforma de processamento em nuvem GEE e o algoritmo RF demonstraram o potencial para armazenar e integrar os mosaicos de imagens de satélite e processá-los de forma eficaz e rápida.

Outro aspecto relevante é o potencial deste tipo de processamento e a expectativa de refinamento da classificação dos períodos bienais do café Arábica. A utilização de séries sazonais, que consideram as fases fenológicas de desenvolvimento da planta, e a incorporação de outros dados do uso da terra devem ampliar ainda mais a qualidade do mapeamento do café.

Referências

- ABIC (2023). Associação Brasileira da Indústria de Café. Disponível em: <https://www.Abic.com.br>.
- ALONSO, A et al. Wetland Landscape spatio-temporal degradation dynamics using the new Google Earth Engine cloud-based platform: Opportunities for non-specialists in remote sensing. *Transactions of The Asabe*, v. 59, n. 5, p. 1333–1344, 2016.
- AMANI, Meisam et al. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 13, p. 5326–5350, 2020.
- BREIMAN, L. (2001). Random Forests. *Machine learning*, 45(1), 5–32.
- CAMARGO, A. P., & CAMARGO, M. B. P. (2001). Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*, 60(1), 65–68.
- CHEMURA, Abel; MUTANGA, Onesimo. Developing detailed age-specific thematic maps for coffee (*Coffea arabica* L.) in heterogeneous agricultural landscapes using random forests applied on Landsat 8 multispectral sensor. *GEOCARTO INTERNATIONAL*, v. 32, n. 7, p. 759–776, 2017.
- CHEN, Zhiheng; ZHAO, Shuhe. Automatic monitoring of surface water dynamics using Sentinel-1 and Sentinel-2 data with Google Earth Engine. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION*, v. 113, set. 2022.
- CIIAGRO. (2022). Centro Integrado de Informações agrometeorológicas. Disponível em: <https://www.ciiagro.sp.gov.br/index.asp>
- CONAB. (2023). Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em:

<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>

- DEINES, Jillian M et al. Mapping three decades of annual irrigation across the US High Plains Aquifer using Landsat and Google Earth Engine. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, v. 233, nov. 2019.
- HANSEN, M. C., POTAPOV, P. v., MOORE, R., HANCHER, M., TURUBANOVA, S. A., & TYUKAVINA, A. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342, 850–853.
- HUANG, Chenlu; YANG, Qinke; ZHANG, Hui. Temporal and Spatial Variation of NDVI and Its Driving Factors in Qinling Mountain. *WATER*, v. 13, n. 22, nov. 2021.
- HUNT, D. A., Tabor, K., Hewson, J. H., Wood, M. A., Reymondin, L., Koenig, K., Schmitt-Harsh, M., & Follett, F. (2020). Review of remote sensing methods to map coffee production systems. In *Remote Sensing* (Vol. 12, Issue 12, pp. 1–23). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12122041>
- IBGE - O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/espírito-santo-do-pinhhal/pesquisa/24/27745>.
- KAWAKUBO, Fernando Shinji; PEREZ MACHADO, Reinaldo Paul. Mapping coffee crops in southeastern Brazil using spectral mixture analysis and data mining classification. *INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING*, v. 37, n. 14, p. 3414–3436, jul. 2016
- KELLEY, L. C., Pitcher, L., et al. (2018). Using Google Earth Engine to Map Complex Shade-Grown Coffee Landscapes in Northern Nicaragua. *REMOTE SENSING*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/rs10060952>
- KUMAR, Lalit; MUTANGA, Onesimo. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. *Remote Sensing*, v. 10, n. 10, 1 out. 2018.
- LIU, Aobo; WU, Qizhong; CHENG, Xiao. Using the Google Earth Engine to estimate a 10 m resolution monthly inventory of soil fugitive dust emissions in Beijing, China. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, v. 735, set. 2020.
- MARTINEZ-VERDUZCO, Guillermo C; MAURICIO GALEANA-PIZANA, J; CRUZ-BELLO, Gustavo M. Coupling Community Mapping and supervised classification to discriminate Shade coffee from Natural vegetation. *APPLIED GEOGRAPHY*, v. 34, p. 1– 9, maio 2012.
- MASKELL, G., Chemura, A., Nguyen, H., Gornott, C., & Mondal, P. (2021). Integration of Sentinel optical and radar data for mapping smallholder coffee production systems in Vietnam. *Remote Sensing of Environment*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112709>

- MOREIRA, M A; ADAM, M; RUDORFF, B F T. Spectral and temporal behavior analysis of coffee crop in Landsat images. PESQUISA AGROPECUARIA BRASILEIRA, v. 39, n. 3, p. 223–231, mar. 2004.
- NASA. (2022). National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <https://www.Nasa.gov/>.
- OLOFSSON, P., Foody, G.M., Herold, M., Stehman, S. V, Woodcock, C.E., Wulder, M.A.. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. Remote Sens Environ 148, 42–57, 2014.
- ORTEGA-HUERTA, Miguel et al. Mapping coffee plantations with Landsat imagery: an example from El Salvador. INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, v. 33, n. 1, p. 220–242, 2012.
- REVISTA ESPRESSO. (2022). Espresso. Disponível em: <https://Revistaespresso.com.br/>.
- TAMIMINIA, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. In ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (Vol. 164, pp. 152–170).Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- TARDIN, A. T., DE ASSUNCAO, G. v, & SOARES, J. v. (1992). preliminary-analysis of tm data for coffee, citrus and sugarcane discrimination in furnas region, mg, brazil. pesquisa agropecuaria brasileira, 27(9), 1355–1361.
- USGS. (2022). United States Geological Survey. <https://Www.Usgs.Gov/>.

Linha de Pesquisa: Estudos teóricos e aplicados em Climatologia

ANÁLISE DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE HUMANA AO FOGO NOS MUNICÍPIOS DA AMAZÔNIA LEGAL QUE MAIS QUEIMARAM ENTRE 2010- 2020

Thales Vaz Penha¹, Maria Elisa Siqueira Silva¹

¹Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia

thales.penha@usp.br

Resumo

O fogo é uma das maiores ameaças aos ecossistemas e às pessoas que vivem na Amazônia Legal brasileira. Seu uso está associado historicamente às práticas tradicionais de comunidades para subsistência e também é utilizado para a manutenção das pastagens e atividades agrícolas em propriedades rurais. A prática do fogo também está diretamente ligada às atividades econômicas da região, como a extração seletiva de madeira e a expansão de novas fronteiras produtivas por meio do desmatamento. O fogo pode afetar as pessoas, principalmente aquelas em condições vulneráveis, pois impacta suas principais fontes de renda e a saúde respiratória decorrente da piora da qualidade do ar. A vulnerabilidade ao fogo pode ser entendida como o potencial de um sistema socioecológico de sofrer danos, que podem aumentar ou diminuir de acordo com as características inerentes aos sistemas humanos e naturais. O mapeamento da vulnerabilidade tem sido uma ferramenta eficaz para compreender os padrões espaciais de vulnerabilidade ao fogo, melhorando a gestão do risco e reduzindo a exposição humana e ecológica. Este trabalho teve como objetivo avaliar os aspectos do sistema humano que tornam os cinco municípios que mais queimam na Amazônia Legal brasileira no período de 2010 a 2020 vulneráveis ao fogo, aplicando uma abordagem de oito indicadores socioeconômicos e ambientais para gerar um índice integrado de vulnerabilidade humana ao fogo (IVH). Os resultados do presente estudo demonstram que a vulnerabilidade do sistema humano atual, representada pelo IVH, se destaca no município de Colniza-MT por apresentar o maior valor (IVH = 2,25). A vulnerabilidade deste município está associada à alta dependência econômica da atividade madeireira, ao empobrecimento da população e ao alto percentual de territórios vulneráveis. O estudo aponta que a capacidade socioeconômica é um fator determinante na caracterização da vulnerabilidade do sistema humano ao fogo.

Palavras-chave: *Risco de Fogo; Indicadores Socioeconômicos; Incêndios Florestais.*

Research Line: Theoretical and applied studies in Climatology

**ANALYSIS OF THE HUMAN VULNERABILITY INDEX TO FIRE
IN THE LEGAL AMAZON MUNICIPALITIES THAT HAD THE MOST BURNINGS
BETWEEN 2010-2020**

Thales Vaz Penha¹, Maria Elisa Siqueira Silva¹

¹University of Sao Paulo, Department of Geography

thales.penha@usp.br

Abstract

Fire is one of the greatest threats to ecosystems and to the people living in the Brazilian Legal Amazon. Its use is historically associated with the traditional practices of communities for subsistence and is also used for the maintenance of pastures and agricultural activities on rural properties. The practice of using fire is also directly linked to the region's economic activities, such as selective logging and the expansion of new productive frontiers through deforestation. Fire can affect people, especially those in vulnerable conditions, as it impacts their main sources of income and respiratory health due to the worsening air quality. Vulnerability to fire can be understood as the potential of a socio-ecological system to suffer damage, which can increase or decrease according to the inherent characteristics of human and natural systems. Mapping vulnerability has been an effective tool for understanding the spatial patterns of vulnerability to fire, improving risk management, and reducing human and ecological exposure. This study aimed to evaluate the aspects of the human system that make the five municipalities with the highest incidence of fires in the Brazilian Legal Amazon from 2010 to 2020 vulnerable to fire. An approach using eight socioeconomic and environmental indicators was applied to generate an integrated human vulnerability to fire index (IVH). The results of this study show that the vulnerability of the current human system, represented by the IVH, is highest in the municipality of Colniza-MT, with the highest value (IVH = 2.25). The vulnerability of this municipality is associated with a high economic dependence on logging, the impoverishment of the population, and a high percentage of vulnerable territories. The study indicates that socioeconomic capacity is a determining factor in characterizing the vulnerability of the human system to fire.

Keywords: *Fire Risk; Socioeconomic Indicators; Forest Fires.*

Introdução

O fogo, podendo ser na forma de queimada ou incêndio florestal, é uma das maiores ameaças às pessoas que vivem na Amazônia Legal brasileira. O uso do fogo está associado historicamente às práticas tradicionais de comunidades e povos originários para subsistência e também é utilizado para o estímulo à rebrota da vegetação em pastagens e limpeza de áreas para atividades agrícolas em propriedades rurais. Também está diretamente ligado a atividades econômicas da região, como a extração seletiva de madeira, o desmatamento, uso em pastagens para manutenção de gado, e ao manejo em áreas agrícolas (PIVELLO, 2011). Quando não controlada, a prática do fogo intencional ou não, ilegal ou não, pode escapar para a vegetação adjacente que, em condições que favorecem a inflamabilidade, funcionam como combustível para a ocorrência de queimadas e incêndios florestais (ARAGÃO et al., 2008).

O fogo pode impactar diretamente a mortalidade de árvores, a queima de florestas primárias, perdas econômicas principalmente para pequenos agricultores, a ampliação da fragmentação florestal, ocorrência de mudanças na estrutura ecológica da floresta, a liberação de carbono para atmosfera; a propagação do fogo pode afetar diretamente a saúde das pessoas, principalmente aquelas em condições vulneráveis (ANDERSON et al., 2019; SMITH et al., 2014). A vulnerabilidade ao fogo pode ser entendida como o potencial de um sistema socioecológico de sofrer danos, que pode aumentar ou diminuir de acordo com as características inerentes aos sistemas humanos e naturais (MENEZES et al., 2018; RORATO et al., 2022). A vulnerabilidade ao fogo é, portanto, o resultado da interação entre o meio físico e as condições climáticas, a susceptibilidade da vegetação à combustão, o uso e cobertura da terra, as características socioeconômicas da população e a capacidade político-institucional de gestão do território e do risco do fogo.

O mapeamento de vulnerabilidade tem sido uma ferramenta eficaz que permite compreender os padrões espaciais de vulnerabilidade às mudanças climáticas, melhorar a gestão do risco de desastres, reduzir a exposição humana e ecológica às ameaças climáticas e contribuir para a identificação de populações particularmente vulneráveis (PRESTON et al., 2009). Muitos estudos se baseiam em indicadores para avaliar a vulnerabilidade das populações e territórios uma vez que permitem comparações entre os sistemas avaliados, facilitam a visualização de informações e o diagnóstico de maneira simples e objetiva (FUSSEL et al., 2007). Na região amazônica, em particular, identificar vulnerabilidades ao fogo é de ordem complexa devido às dimensões e heterogeneidades de seu território, além de poderem estar associadas a parâmetros de vulnerabilidades físicas, sociais, econômicas, políticas e ecológicas, em que regiões onde muitas vezes há escassez de dados (ANDERSON et al., 2019).

Este trabalho teve como objetivo avaliar os aspectos do sistema humano que tornaram os dez municípios que mais queimaram na Amazônia Legal brasileira no período de 2010 a 2020 vulneráveis ao fogo, aplicando uma abordagem de oito indicadores para gerar um índice integrado de vulnerabilidade humana ao fogo (IVH). Este índice expressa como o sistema humano, na escala municipal, é sensível ao fogo, representando as características socioeconômicas dos municípios para lidar com o risco de fogo.

Materiais e Métodos

A área de estudo foi definida pelos cinco municípios com maior histórico de fogo na Amazônia Legal (AL). Foi avaliado o total acumulado de focos de calor no período de 2010a 2020 em cada município, com base nos dados do sensor MODIS-AQUA, obtido do portal do *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS-NASA). Desta forma, os cinco municípios analisados neste estudo são: (1) São Félix do Xingu (PA), com 66.019 focos de calor acumulados; (2) Porto Velho (RO), com 55.806 focos de calor acumulados; (3) Altamira (PA), com 54.167 focos de calor acumulados; (4) Novo Progresso (PA), com 31.555 focos de calor acumulados; e (5) Colniza (MT), com 30.414 focos de calor acumulados.

A primeira etapa metodológica para a construção do índice de vulnerabilidade humana ao fogo (IVH) consistiu no levantamento e seleção de indicadores para os municípios da AL que representassem as características de sensibilidade do sistema humano de sofrer ou potencializar o dano ao fogo, principalmente relacionado aos aspectos socioeconômicos e de infraestrutura do município (Tabela 1). Os indicadores selecionados refletem o perfil demográfico dos grupos vulneráveis, a existência de territórios vulneráveis, o histórico de poluição do ar no município, o nível de acesso à infraestrutura urbana nos municípios, o grau de inclusão social em termos de saúde e educação da população, a capacidade de renda da população para lidar com emergências, a dependência econômica de atividades madeireiras e a capacidade institucional do município para gestão do território e do fogo.

Em seguida, os oito indicadores passaram pela etapa de tratamento dos dados de modo a contabilizá-los para as análises. Os procedimentos foram realizados para todos os 768 municípios da AL e, posteriormente, os cinco municípios analisados foram avaliados. As etapas que se sucederam foram baseadas no trabalho de Nardo *et al.* (2008). Na etapa de tratamento dos dados, observou-se a distribuição dos valores, verificou-se a presença de valores espúrios (*outliers*) e imputou-se valores a dados ausentes (valor médio). Depois, para tornar os dados compatíveis, realizou-se a etapa de padronização dos indicadores (método de normalização máximo-mínimo). Logo após, atribuiu-se uma pontuação aos indicadores (*scoring*) por nível de vulnerabilidade (expresso pelos intervalos de quartis), de forma que os

valores de baixa, média e alta vulnerabilidades correspondem aos intervalos entre o 1º e 2º quartis, 2º e 3º quartis, 3º e 4º quartis que receberam os valores 1, 2 e 3, respectivamente. Por fim, calculou-se o IVH aplicando uma média aritmética entre os oito indicadores.

Tabela 1 – Indicadores selecionados para a composição do índice de vulnerabilidade humano (IVH) ao fogo.

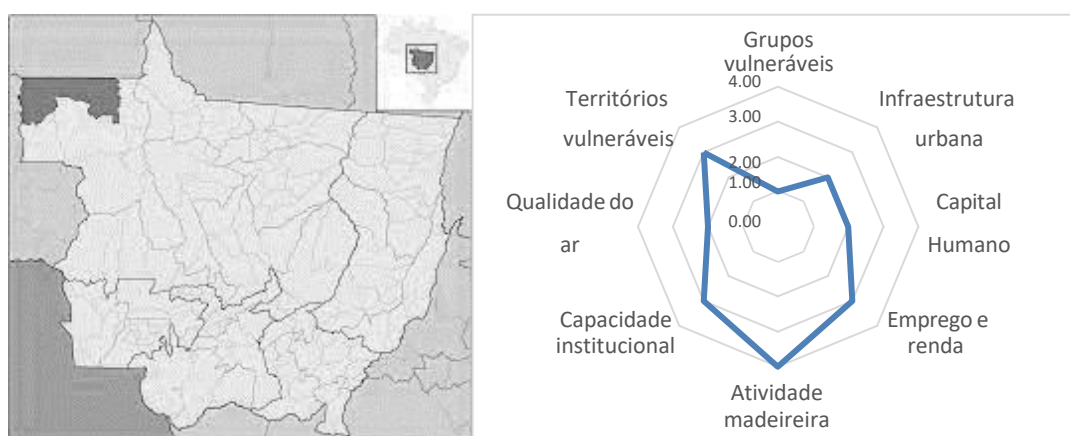
Dimensão	Indicador	Quantificação e descrição do indicador	Fonte
Demografia	Grupos vulneráveis	Indicador composto pela soma da proporção de pessoas que se declaram indígenas em territórios indígenas, pessoas idosas (mais que 65 anos) e crianças (menores que 5 anos) no município. Indica o perfil populacional mais sensível aos efeitos do fogo à saúde humana.	Censo 2010 - IBGE
Vulnerabilidade e social	Infraestrutura urbana	IVS Infraestrutura Urbana. Indica o grau de acesso da população a serviços e infraestrutura urbana.	IPEA (2015)
Vulnerabilidade e social	Capital humano	IVS Capital Humano. Indica o grau de inclusão social das populações vulneráveis em termos de saúde e educação.	IPEA (2015)
Vulnerabilidade e social	Emprego e renda	IVS Trabalho e Renda. Indica o perfil de renda da população para lidar com adversidades.	IPEA (2015)
Economia	Atividade madeireira	Percentual do PIB com dependência dos produtos madeireiros (Silvicultura). Proxy de vulnerabilidade econômica do extrativismo ao fogo	IBGE
Gestão do risco	Capacidade institucional	Existência de equipamento de gestão do fogo (brigadistas, bombeiros, defesa civil). Indica a disponibilidade de equipamentos e recursos para combater o fogo.	MUNIC/IBGE
Poluição	Qualidade do ar	Concentração de PM2.5 por área (mcg/m ³ / km ²). Indica o quanto inadequado está o ar para a saúde humana.	SEDAC/NAS A
Territórios vulneráveis	Terras indígenas, quilombolas e assentamentos rurais	Percentual da área no município com presença de territórios indígenas, quilombolas e assentamentos rurais. Indica a presença de territórios sensíveis ao impacto do fogo.	INCRA

Resultados e Discussões

Os resultados da análise são apresentados na Tabela 2. O município com a maior vulnerabilidade humana ao fogo é Colniza-MT (IVH = 2,25), que embora seja o 5º município que o fogo acumulado entre 2010 e 2020 apresenta características do sistema humano que tornam mais vulnerável ao fogo (Figura 1). As maiores vulnerabilidades são explicadas pela contribuição dos indicadores de dependência da atividade madeireira (valor 4 – cerca de 21,19% do PIB dependente da atividade madeireira), presença de territórios vulneráveis (valor 3 – cerca de 29,5% da área do município) e emprego e renda (valor 3).

Tabela 2 - Resultado do cálculo do índice de vulnerabilidade humana ao fogo.

Município	UF	INDICADORES DE VULNERABILIDADE HUMANA								IVH
		Grupos vulneráveis	Infraestrutura urbana	Capital Humano	Emprego e renda	Atividade e madeireira	Capacidade institucional	Qualidade do ar	Territórios vulneráveis	
		Direta	Direta	Direta	Direta	Direta	Indireta	Direta	Direta	
São Félix do Xingu	PA	0.00	3.00	3.00	2.00	3.00	4.00	1.00	4.00	2
Porto Velho	RO	0.00	2.00	1.00	0.00	2.00	4.00	0.00	3.00	1
Altamira	PA	3.00	2.00	2.00	1.00	3.00	3.00	1.00	4.00	2,125
Novo Progresso	PA	0.00	3.00	2.00	1.00	4.00	3.00	3.00	2.00	2
Colniza	MT	1.00	2.00	2.00	3.00	4.00	3.00	2.00	3.00	2,25

**Figura 1** – Localização de Colniza (MT) e gráfico de radar do IVH para o município.

O segundo município com sistema humano mais vulnerável é Altamira-PA (IVH = 2,125), com uma área de 159.533,328 km², segundo o IBGE, em 2017, posicionando-se como o município mais extenso do Brasil. As maiores vulnerabilidades ao fogo são explicadas pela contribuição dos indicadores de presença de territórios vulneráveis (valor 4 – correspondendo a 59,35% da área do município) e grupos vulneráveis (valor 3 – cerca de 18,33% da população com perfil demográfico mais sensível ao fogo) (Figura 2).

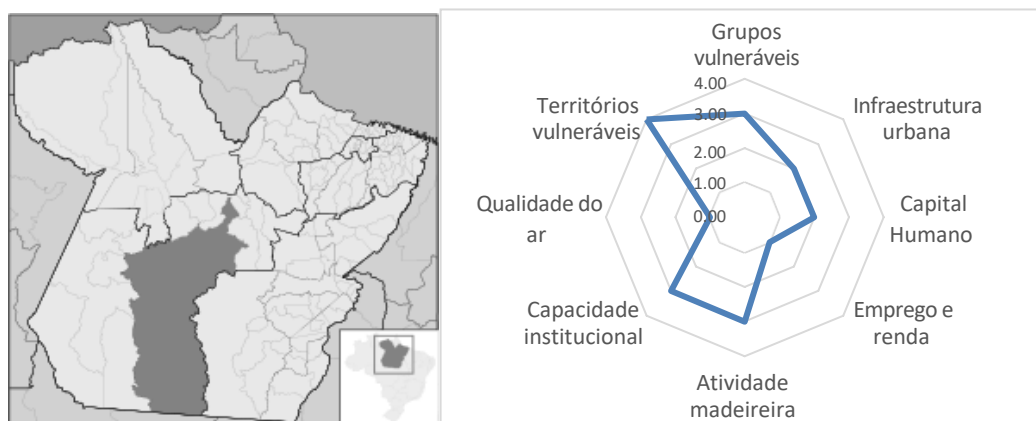


Figura 2 – Localização de Altamira (PA) e gráfico de radar do IVH para o município.

O terceiro e quarto municípios com sistema humano mais vulnerável são: São Félix do Xingu (PA) (IVH = 2,0) e Novo Progresso (PA) (IVH = 2,0), respectivamente. Em ambos os municípios um dos principais indicadores de vulnerabilidade humana é a infraestrutura urbana precária (valor 3 para os dois municípios). Em São Félix do Xingu (Figura 3), que é o município com maior registro histórico de queimadas de 2010 a 2020, a maior vulnerabilidade do sistema humano se explica para forte presença de territórios vulneráveis (valor 4 – cerca de 59% da área do município), seguido do capital humano (valor 3 – 0,58 na escala de 0 a 1 desta componente do índice IVS). Por outro lado, o município apresenta boa capacidade institucional para a gestão de combate ao fogo (valor 4), que indica a existência de grupo de brigadistas, bombeiros e defesa civil. Enquanto em Novo Progresso (Figura 4) a vulnerabilidade do sistema humano se explica pela baixa qualidade do ar (valor 3 – cerca de 8,25 mcg/m³ / km²) e pela dependência à atividade madeireira (valor 4 – cerca de 3% do PIB dependente da atividade madeireira).

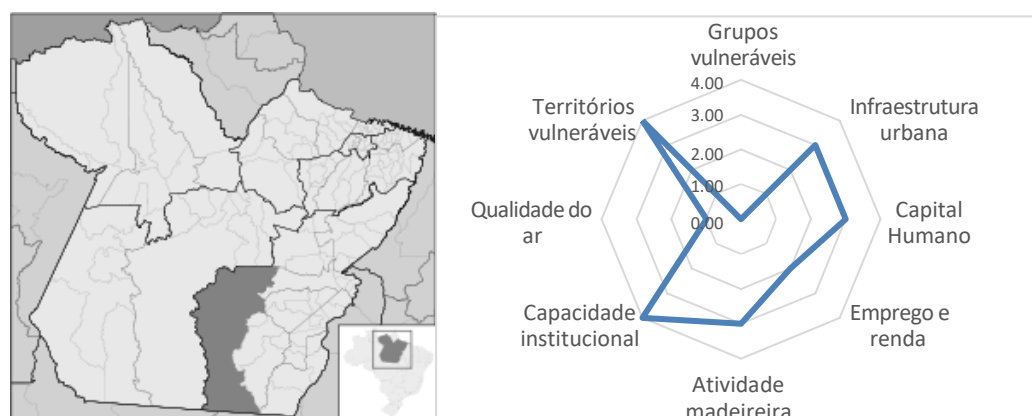


Figura 3 – Localização de São Félix do Xingu (PA) e gráfico de radar do IVH para o município.

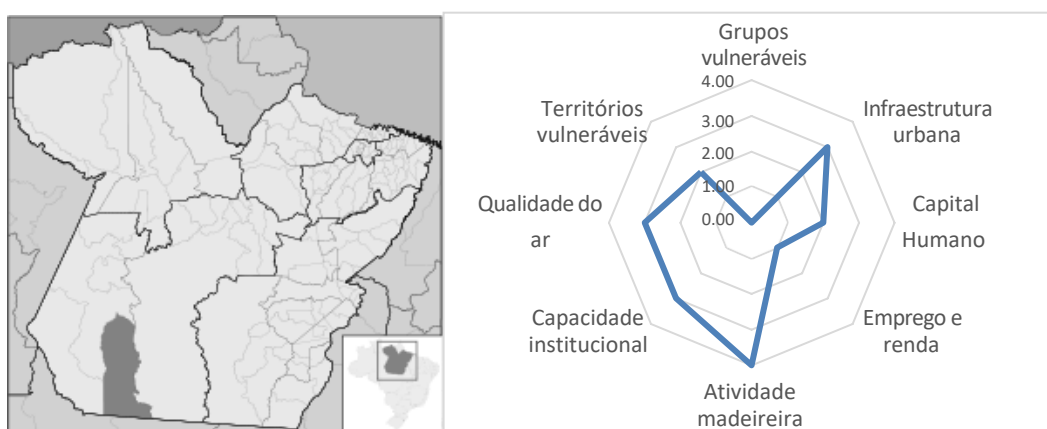


Figura 4 – Localização de Novo Progresso (PA) e gráfico de radar do IVH para o município.

Por fim, o quinto município com sistema humano mais vulnerável é Porto Velho (RO) (Figura 5), capital do estado e maior população dentre os cinco municípios analisados (539.354 pessoas em 2020, segundo dados do IBGE). A vulnerabilidade do sistema humano neste município se explica principalmente pela presença de territórios vulneráveis (valor 3 – cerca de 20% da área do município), em contrapartida é um município com alto valor de capacidade institucional na gestão de combate ao fogo (valor 4), que indica existência forte de brigadistas, bombeiros e defesa civil.

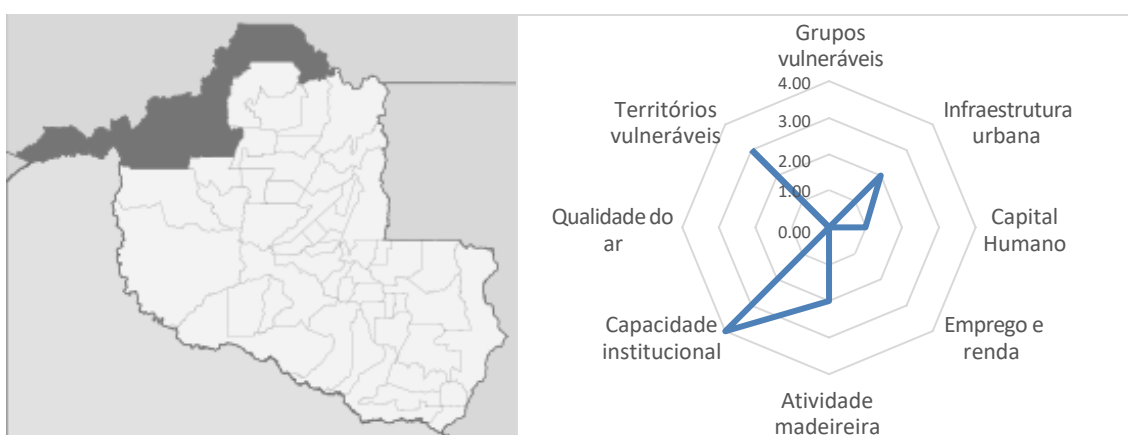


Figura 5 – Localização de Porto Velho (RO) e gráfico de radar do IVH para o município.

Os resultados do presente estudo demonstram que a vulnerabilidade do sistema humano atual, representada pelo IVH foi bastante semelhante entre os cinco municípios analisados. O município de Colniza (MT) é o que apresentou o maior valor de IVH, embora seja o quinto em fogo acumulado, suas características de vulnerabilidade humana estão expressas pela alta dependência da economia do município à

atividade madeireira, população empobrecida com baixo valor do indicador de emprego e renda, além de possuir alto percentual de territórios vulneráveis.

Por outro lado, Porto Velho (RO), que apresentou vulnerabilidade humana mais baixa, tem seu valor de IVH explicado principalmente por apresentar pouca vulnerabilidade social (Emprego e renda e capital social com valores baixos), qualidade do ar pouco comprometida e maior capacidade institucional para lidar com a ocorrência do fogo.

Os três municípios partilham de algumas vulnerabilidades em comum, como a da dependência da atividade madeireira e a presença de territórios vulneráveis ao fogo (valores acima de 3). Além disso, nos casos de São Félix do Xingu e Novo Progresso, o indicador de vulnerabilidade social de infraestrutura é mais alto, refletindo o pouco acesso da população a serviços de saneamento básico (água, esgoto e lixo) e de mobilidade urbana (tempo de deslocamento casa-trabalho). Já em Altamira (PA), o perfil demográfico de pessoas vulneráveis ao fogo (idosos, crianças e indígenas) é um grande contribuidor para o IVH.

Os cinco municípios analisados pertencem à região denominada de Arco do Desmatamento, cujo histórico do fogo está fortemente associado ao desmatamento e à expansão de áreas produtivas agropecuárias. Desta forma, justificando o indicador de atividade madeireira apresentar uma contribuição importante para o IVH destes municípios. Além disso, por ser uma zona de disputas territoriais e expansão econômica, muitos territórios como as terras indígenas, quilombolas e assentamentos rurais são sensíveis ao fogo devido às intensas dinâmicas de mudanças de uso e cobertura da terra. Cabe ressaltar que pelo histórico do fogo na região, o indicador de capacidade institucional dos cinco municípios analisados pode ser considerado alto, o que os tornam mais preparados para combater o fogo do ponto de vista da gestão.

Entretanto, os aspectos mais relacionados à vulnerabilidade social variam um pouco mais, determinando o estado da qualidade de vida da população no município. Conforme salienta Menezes et al. (2018), ao construir um índice de vulnerabilidade municipal para o estado do Amazonas, as populações desta região apresentaram necessidade de melhorias em suas condições de vida e saúde, pois a pobreza foi um dos fatores que mais influenciaram a alta vulnerabilidade dos municípios.

Outro passo importante para melhorar a resiliência do município ao fogo é investir em infraestrutura e equipamentos, além de aumentar a capacidade de prevenção, incluindo formas de organização local e estratégias políticas e legais para mitigar os riscos, tais como a regulamentação do uso do fogo e alternativas às práticas dependentes do fogo (ANDERSON et al., 2019).

Considerações Finais

O município de Colniza (MT) é o município, dentre os cinco que mais apresentaram fogo acumulado no período de 2010 a 2020, com maior valor de vulnerabilidade humana ao fogo, segundo o método usado neste estudo. A partir de uma análise quantitativa e qualitativa dos valores dos indicadores que compõem o IVH, verificou-se que, para os cinco municípios analisados, a atividade madeireira e a presença de territórios vulneráveis foram determinantes para a vulnerabilidade final do sistema humano ao fogo. Porém, são os indicadores de vulnerabilidade social que diferenciam o grau de capacidade socioeconômica dos municípios e o grau de vulnerabilidade da população que vive neles. Nesse sentido, embora as condições que afetam os perfis de vulnerabilidade das populações sejam determinadas por interações entre os elementos físicos e ecológicos locais com a ameaça do fogo, algumas condições são consideradas determinantes e comuns em muitos estudos de vulnerabilidade e estão intimamente relacionadas a questões de desenvolvimento socioeconômico como, por exemplo, pobreza, renda e saúde, assim como comentam Brooks *et al.* (2005). Assim, este estudo mostrou que questões socioeconômicas, como o aumento da renda das populações e o acesso à infraestrutura, também são relevantes para a determinação da vulnerabilidade ao fogo e que não somente medidas de prevenção e combate devem ser prioritárias na construção de políticas públicas com a finalidade de redução das vulnerabilidades ao fogo.

Referências

- ANDERSON, Liana Oighenstein; MARCHEZINI, Victor; MORELLO, Thiago Fonseca; CUNNINGHAM, Christopher Alexander. Modelo conceitual de sistema de alerta e de gestão de riscos e desastres associados a incêndios florestais e desafios para políticas públicas no Brasil. **Territorium**, [S.L.], n. 26, p. 43-61, 4 abr. 2019. Coimbra University Press. http://dx.doi.org/10.14195/1647-7723_26-1_4. Disponível em: https://impactum-journals.uc.pt/territorium/article/view/1647-7723_26-1_4/5166. Acesso em: 13 abr. 2024.
- ARAGÃO, Luiz Eduardo O.C; MALHI, Yadvinder; BARBIER, Nicolas; LIMA, Andre; SHIMABUKURO, Yosio; ANDERSON, Liana; SAATCHI, Sassan. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions Of The Royal Society B: Biological Sciences**, [S.L.], v. 363, n. 1498, p. 1779-1785, 11 fev. 2008. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2007.0026>. Disponível em:

<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2007.0026>. Acesso em: 13 abr. 2024.

BROOKS, Nick; ADGER, W. Neil; KELLY, P. Mick. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. **Global Environmental Change**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 151-163, jul. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.12.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959378004000913>. Acesso em: 13 abr. 2024.

FÜSSEL, Hans-Martin; KLEIN, Richard J. T.. Climate Change Vulnerability Assessments: an evolution of conceptual thinking. **Climatic Change**, [S.L.], v. 75, n. 3, p. 301-329, abr. 2006. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-0329-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-006-0329-3>. Acesso em: 13 abr. 2024.

IPEA, INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Atlas da vulnerabilidade social nos municípios brasileiros / editores: Marco Aurélio Costa, Bárbara Oliveira Margut – Brasília : IPEA, 2015.

MENEZES, Júlia Alves; CONFALONIERI, Ulisses; MADUREIRA, Ana Paula; DUVAL, Isabela de Brito; SANTOS, Rhavena Barbosa dos; MARGONARI, Carina. Mapping human vulnerability to climate change in the Brazilian Amazon: the construction of a municipal vulnerability index. **Plos One**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 1-30, 14 fev. 2018. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0190808>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0190808>. Acesso em: 13 abr. 2024.

NARDO, M. SAISANA, M. SALTELLI, A. TARANTOLA, S. HOFFMANN, A. GIOVANNINI, E. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. Paris (France): OECD publishing; 2008. JRC47008

PIVELLO, Vânia R.. The Use of Fire in the Cerrado and Amazonian Rainforests of Brazil: past and present. **Fire Ecology**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 24-39, abr. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.4996/fireecology.0701024>. Disponível em: <https://fireecology.springeropen.com/articles/10.4996/fireecology.0701024>. Acesso em: 13 abr. 2024.

PRESTON, Benjamin L.; YUEN, Emma J.; WESTAWAY, Richard M.. Putting vulnerability to climate change on the map: a review of approaches, benefits, and risks. **Sustainability Science**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 177-202, 24 mar. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11625-011-0129-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11625-011-0129-1>. Acesso em: 13 abr. 2024.

- RORATO, Ana C.; ESCADA, Maria Isabel S.; CAMARA, Gilberto; PICOLI, Michelle C.A.; VERSTEGEN, Judith A.. Environmental vulnerability assessment of Brazilian Amazon Indigenous Lands. **Environmental Science & Policy**, [S.L.], v. 129, p. 19-36, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2021.12.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901121003609>. Acesso em: 13 abr. 2024.
- SMITH, Lauren T.; ARAGÃO, Luiz E. O. C.; SABEL, Clive E.; NAKAYA, Tomoki. Drought impacts on children 's respiratory health in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 1-8, 16 jan. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/srep03726>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep03726>. Acesso em: 13 abr. 2024.

Linha de Pesquisa: Estudos interdisciplinares em Pedologia e Geomorfologia

AValiação DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NASADEM E COP-DEM PARA O MAPEAMENTO DA COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA BACIA DO RIO URUBU (MÉDIO ARAGUAIA), TOCANTINS/BRASIL

Amanda de Fátima Martin Catarucci ¹, Fernando Nadal Junqueira Villela¹

¹Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia

amanda.catarucci@usp.br

Resumo

O mapeamento da compartimentação geomorfológica compreende a distinção, individualização e representação dos padrões das formas do relevo a partir da caracterização qualitativa e quantitativa dos elementos que o compõem. Em geral, tais mapeamentos incluem técnicas de interpretação estereoscópica de fotografias aéreas conjugadas com a avaliação de dados obtidos de cartas topográficas. Entretanto, o avanço de técnicas de Sensoriamento Remoto e da manipulação de dados por meio de softwares que compõem Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permitiram a elaboração e o aperfeiçoamento dos métodos de obtenção de informações morfométricas e de representação morfológica, sobretudo diante dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs). Todavia, é necessário avaliar qual o modelo mais adequado à proposta de pesquisa e, assim, evitar a propagação de erros oriundos da utilização de tais bases. Dessa forma, este trabalho procurou avaliar a acurácia posicional vertical dos dados coletados de diferentes sistemas sensores dos Programas Copernicus DEM (COP-DEM) e NASADEM e os respectivos Modelos Digitais de Elevação gerados para a sub-bacia do Rio Urubu na região do Médio Rio Araguaia (Tocantins/Brasil). A execução do trabalho compreendeu o levantamento e avaliação de estudos de acurácia vertical dos MDEs derivados dos sistemas COP-DEM e NASADEM, a partir dos critérios definidos pelo Decreto 89.817/1984 que estabelece Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e pelo Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Digitais (PEC-PCD), além da avaliação dos diferentes métodos empregados e demais trabalhos para os mesmos sistemas de sensores, com avaliações quantitativas e qualitativas robustas. A análise visual qualitativa dos MDEs processados (com resolução espacial de 30 m) e de diferentes perfis topográficos derivados desses modelos foi realizada utilizando ferramentas de processamento do QGIS 3.22 Biatowiesia. O MDE COP-DEM, para escala 1:50.000, apresentou melhor acurácia vertical em relação ao MDE NASADEM. Tal diferença também foi evidenciada na comparação dos perfis topográficos gerados a partir de cada um dos modelos.

Palavras-chave: *Modelo Digital de Elevação; Geoprocessamento; Acurácia Altimétrica.*

Research Line: Interdisciplinary studies in Pedology and Geomorphology**EVALUATION OF NASADEM AND COP-DEM DIGITAL ELEVATION MODELS FOR THE MAPPING OF THE GEOMORPHOLOGICAL COMPARTMENTALIZATION OF THE URUBU RIVER BASIN (MIDDLE ARAGUAIA), TOCANTINS/BRAZIL**

Amanda de Fátima Martin Catarucci ¹, Fernando Nadal Junqueira Villela¹

¹University of Sao Paulo, Department of Geography

amanda.catarucci@usp.br

Abstract

The geomorphological compartmentalization mapping comprises the distinction, individualization and representation of the patterns of landforms, based on the qualitative and quantitative characterization of the elements that compose it. In general, such mappings include techniques of stereoscopic interpretation of aerial photographs combined with the evaluation of data obtained from topographic maps. Nevertheless, the advancement of Remote Sensing techniques and data manipulation through software that compose Geographic Information Systems (GIS) have allowed the elaboration and improvement of methods for obtaining morphometric information and morphological representation, especially from Digital Elevation Models (DEMs). However, it is necessary to evaluate which model is the most appropriated to the research proposal and, thus, avoid the propagation of errors arising from the use of such databases. Thus, this work sought to evaluate the vertical positional accuracy of the data collected from different sensor systems of the Copernicus DEM (COP-DEM) and NASADEM Programs and the respective Digital Elevation Models generated for the Urubu River sub-basin in the region of the Middle Araguaia River (Tocantins/Brazil). The execution of the work included the survey and evaluation of vertical accuracy studies of the MDE derived from the COP-DEM and NASADEM systems, based on the criteria defined by Decree 89.817/1984 that establishes the Cartographic Accuracy Standard (PEC) and the Cartographic Accuracy Standard for Digital Products (PEC-PCD), beyond the evaluation of the different methods used and other work for the same sensor systems, with robust quantitative and qualitative evaluations. The qualitative visual analysis of the processed EDMs (with a spatial resolution of 30 m) and different topographic profiles derived from these models was performed using QGIS 3.22 Biatowiesia processing tools. The MDE COP-DEM, for a scale of 1:50,000, showed better vertical accuracy than the MDE NASADEM. This difference was also evidenced in the comparison of the topographic profiles generated from each model.

Key-words: *Digital Elevation Model; Geoprocessing; Altimetric Accuracy.*

Introdução

O mapeamento da compartimentação geomorfológica envolve a distinção, individualização e representação dos padrões das formas do relevo, mediante caracterização tanto qualitativa quanto quantitativa dos elementos que o compõem. Geralmente, esses mapeamentos combinam técnicas de interpretação estereoscópica de fotografias aéreas com a análise de dados provenientes de cartas topográficas.

No entanto, o desenvolvimento de técnicas avançadas de Sensoriamento Remoto e o uso de softwares de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possibilitaram melhorar e aprimorar os métodos de obtenção de informações morfométricas e de representação morfológica.

Especificamente, os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) têm desempenhado um papel crucial nesse aprimoramento. Contudo, é crucial selecionar o modelo mais apropriado para o objetivo da pesquisa, a fim de evitar a propagação de erros decorrentes do uso de bases inadequadas.

O trabalho procurou levantar e avaliar a acurácia posicional vertical dos diferentes sistemas sensores dos Programas NASADEM e Copernicus DEM (COP-DEM) e dos seus respectivos Modelos Digitais de Elevação (MDE) gerados, visando a aplicação no mapeamento da compartimentação geomorfológica da região de estudo inserida na sub-bacia do Rio Urubu, no Médio Rio Araguaia (Tocantins/Brasil).

Material e Métodos

A área de estudo compreende uma faixa entre as coordenadas 49°04'48"W, 10°03'07"S e 48°58'12"W e 10°53'24"S ao longo da rodovia TO-255, na região do Médio Rio Araguaia, no estado do Tocantins/Brasil, envolvendo a sub-bacia do Rio Urubu em quase toda a sua totalidade (Figura 1).

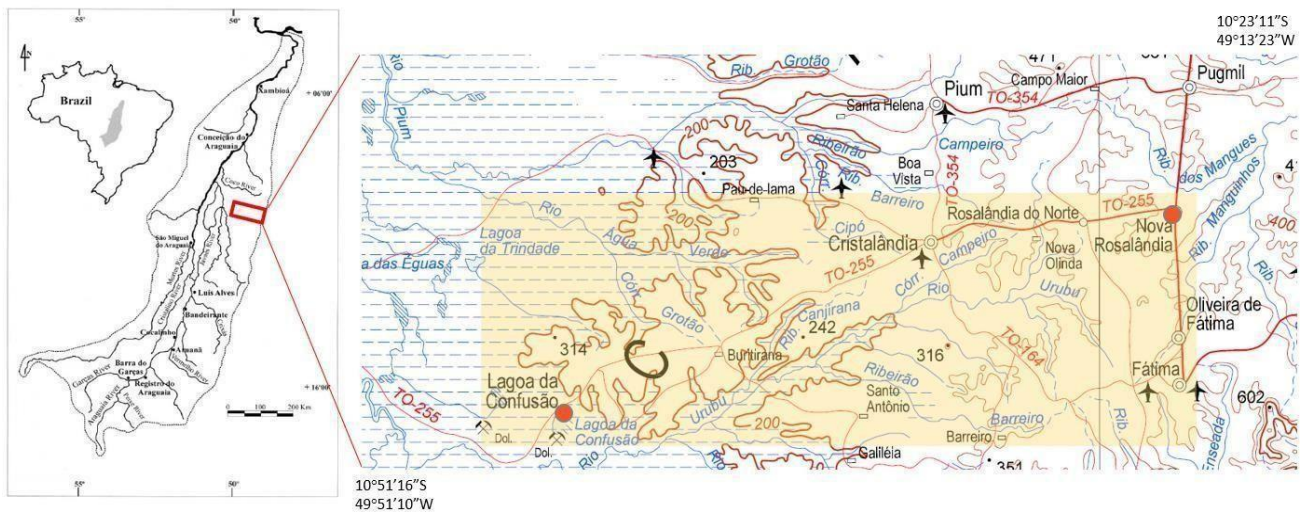


Figura 1. Mapa de Localização da área de estudo. Fonte: IBGE (2005).

As etapas de trabalho compreenderam: (1) o levantamento e avaliação de estudos de acurácia vertical dos MDEs derivados dos sistemas COP-DEM e NASADEM (REIS et al., 2023; CREMON et al., 2022) a partir dos critérios definidos pelo Decreto 89.817/1984, que estabelece Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e pelo Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Digitais (PEC-PCD); (2) avaliação dos diferentes métodos empregados e demais trabalhos para os mesmos sistemas de sensores, com avaliações quantitativas e qualitativas robustas (BIELSKI et al., 2023; UUEMAA et al., 2020; YOGI e STANGANINI, 2023); (3) análise visual qualitativa dos respectivos MDEs processados (resolução espacial de 30m) para a área de estudo de diferentes perfis topográficos derivados desses modelos, realizados por meio das ferramentas de processamento do QGIS 3.22 Biatowiesia.

Resultados e Discussões

Os Modelos Digitais de Elevação da NASADEM e COP-DEM adotados possuem resolução espacial de 30 metros. Ambos apresentam dados GeoTIFF no formato DTED (Digital Terrain Elevation Data) e, portanto, configuram dados de elevação em valores numéricos do tipo Inteiro

(16 bits). Entretanto, adotou-se o COP-DEM que oferece dados do tipo DGED (Defense Gridded Elevation Data), com valores de elevação em decimais (float, 32 bits), o que permite uma melhor representação do relevo, sobretudo para variáveis morfométricas em áreas planas, como é o caso da região da área de estudo. Tal diferença pode ser observada na Figura 2, conforme o sombreamento aplicado para os referidos MDE na área de estudo.

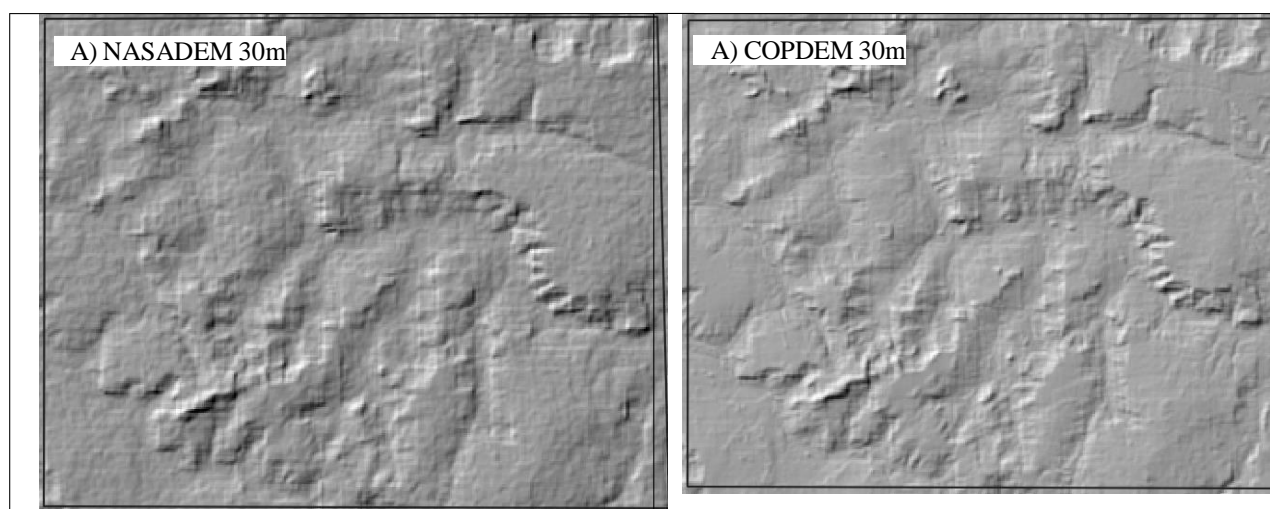


Figura 2. Modelo de sombra NASADEM e COPDEM-30, representativa da área de estudo, na bacia do rio Urubu, TO/Brasil.

A Figura 3 destaca ainda, a partir da construção de diferentes perfis topográficos, uma resposta mais detalhada, suavizada e representativa do modelado derivado do COP-DEM quando comparado ao NASADEM.

Diversos autores descrevem a qualidade desse MDE em regiões no Brasil (BETTIOL et al., 2021; REIS et al., 2023; CREMON et al., 2022). Alguns desses trabalhos (CREMON et al., 2021; REIS et al., 2023; YOGI et al., 2021) tem destacado a qualidade superior do COP-DEM em relação ao NASADEM para a escala de 1:50.000, o que adequa-se completamente à proposta para a área de estudo na bacia do rio Urubu, já que trata-se de modelado de relevo aplainado, com contrastes topográficos mais sutis.

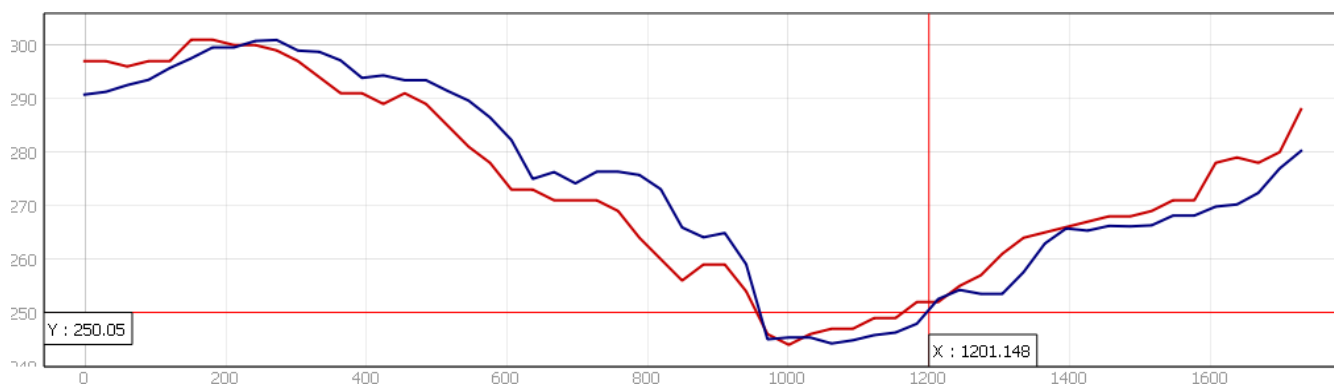


Figura 3. Perfil Topográfico E-W de área de estudo e detalhe do desenho do modelado do relevo, bacia do rio Urubu, TO/Brasil.

Bielski et al. (2023) compararam seis modelos digitais de elevação, entre eles NASADEM e COP-DEM, a partir de critérios pré-definidos e numa abordagem de classificação estatisticamente robusta. Os autores concluíram que o COP-DEM é um dos melhores MDEs a serem utilizados em análises morfométricas, reforçando a avaliação qualitativa obtida nesse estudo.

Considerações Finais

O estudo realizado contribuiu na compreensão da acurácia posicional vertical dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) NASADEM e Copernicus DEM (COP-DEM), bem como sua aplicabilidade no mapeamento da compartimentação geomorfológica.

A adoção do COP-DEM permite uma representação mais detalhada e suavizada do relevo, especialmente em áreas planas. Essa diferença em relação ao NASADEM é evidenciada através de análises visuais, tais como sombreamento aplicado nos MDEs e construção de perfis topográficos, que revelam uma resposta mais representativa do modelado de relevo no COP-DEM. Os resultados obtidos corroboram trabalhos anteriores que também apontaram a qualidade superior do COP-DEM em relação ao NASADEM, especialmente para análises morfométricas em escalas específicas, como a proposta para a área de estudo na bacia do rio Urubu.

Dessa forma, há evidências consistentes sobre a superioridade do COP-DEM em relação ao NASADEM, oferecendo uma base sólida para a escolha adequada de MDEs em análises geomorfológicas. Essa informação é crucial para garantir a precisão e confiabilidade das análises realizadas nesse contexto específico.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradece-se também ao Programa de Pós-Graduação de Geografia Física (PPGF) do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo (DG- FFLCH/USP).

Referências

- BIELSKI, C.; LÓPEZ-VÁZQUEZ, C.; GUTH, P.L.; GROHMANN, C.H. and the TMSG DEMIX Working Group. “DEMIX Wine Contest Method Ranks ALOS AW3D30, COPDEM, and FABDEM as Top 1” Global DEMs”. **arXiv**:2302.08425 [physics.geo-ph], 16 Fev. 2023 [v2]. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.08425>. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2302.08425v2>. Acesso em: 07 Mar. 2023.
- BETTIOL, G. M et al. Conformity of the NASADEM_HGT and ALOS AW3D30 DEM with the Altitude from the Brazilian Geodetic Reference Stations: A Case Study from Brazilian Cerrado. **Sensors**, v. 21, n. 2935, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21092935>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/2935>. Acesso em 13 Mar. 2023.
- CREMON, E. H et al. O. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. **Rev. Bras. Cartogr**, vol. 74, n. 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv74n3-60846>. NASA. NASADEM: creating a new NASA Digital Elevation Model. **Earth Science Data Systems (ESDS) Program**, 18 Fev. 2020. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem>. Acesso em 07 Mar. 2023.
- REIS, M. S.; OLIVEIRA, G. G. De; ANDRADES FILHO, C. de O. Avaliação altimétrica dos modelos digitais de elevação ALOS WORLD 3D30, COPERNICUS DEM E NASADEM para estudos geomorfológicos. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20, 2023. **Anais** [...]. Florianópolis: INPE, 2023. p. 956-959.
- YOGI, F. & Stanganini, F. N. Comparação e Avaliação de Modelos Digitais de Elevação dos sensores SRTM, ASTER, TANDEM/TERRASAR –X, NASADEM, COPERNICUS DEM e ALOS PALSAR para análise digital de terreno. **Research, Society and Development**, v. 12, n.1,2023.
- UUEMA, E.; SANDER, A.; MONTIBELLER, B.; MURU, M. & KMOCH, A. Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). **Remote Sensing**, 12, n. 21, 3482, 2020. DOI:10.3390/rs12213482.

Linha de Pesquisa: Estudos interdisciplinares em Pedologia e Geomorfologia

CARTOGRAFIA MORFOLÓGICA DE DETALHE APLICADA AO ESTUDO DA MORFOGÊNESE DE FEIÇÕES RUGOSAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO DO QUILOMBO, SÃO BENTO DO SAPUCAÍ/SP

Ana Luiza Alcalde Della Coleta¹, Fernando Nadal Junqueira Villela¹

¹Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia

anadellacoleta@usp.br

Resumo

Esta pesquisa tem como objetivo compreender a morfogênese das feições rugosas presentes nas vertentes da bacia hidrográfica do Córrego do Quilombo em São Bento do Sapucaí/SP, Serra da Mantiqueira, sob a hipótese de que essas feições estão associadas a mudanças e rupturas de declive, uma vez que estas estariam concentrando os fluxos hídricos e as ações erosivo-intempéricas dos materiais na superfície e subsuperfície. A análise parte dos pressupostos da cartografia geomorfológica de detalhe, com ênfase na representação morfológica, onde é possível verificar a posição e distribuição das feições rugosas, auxiliando na interpretação da morfodinâmica da paisagem a partir de formas indicadoras de processos atuais e pretéritos. Sendo realizada por meio da fotointerpretação constituídas a partir de fotografias aéreas (1:25.000), as feições estão sendo conferidas em campo com a análise de perfis de solos de diferentes feições rugosas, que incluem no momento mapeamentos hipsométricos, clinográficos e de orientação de vertentes, visando entender os processos erosivos e pedogenéticos envolvidos na morfogênese e desenvolvimento dessas feições. Ao fim dessa pesquisa espera-se contribuir para o entendimento dos processos responsáveis pela configuração do modelado de relevo de áreas montanhosas em meio tropical, oferecendo novas perspectivas sobre esta temática, ainda pouco explorada nos estudos geomorfológicos no Brasil.

Palavras-chave: *Morfogênese; Cartografia Geomorfológica; Cartografia Morfológica de Detalhe.*

Research Line: Interdisciplinary studies in Pedology and Geomorphology**DETAILED MORPHOLOGICAL CARTOGRAPHY APPLIED TO THE STUDY OF THE MORPHOGENESIS OF HUMMOCKY FEATURES IN THE QUILOMBO STREAM WATERSHED, SÃO BENTO DO SAPUCAÍ/SP**

Ana Luiza Alcalde Della Coleta¹, Fernando Nadal Junqueira Villela¹

¹University of Sao Paulo, Department of Geography

anadellacoleta@usp.br

Abstract

This research aims to understand the morphogenesis of hummocky features present on the slopes of the Córrego do Quilombo watershed in São Bento do Sapucaí/SP, Mantiqueira Ridge, under the hypothesis that these rough features are associated with breaks and changes of slope since they could concentrate water flows and erosive-weathering actions of materials above and under the topographic surface. The analysis is based on the assumptions of detailed geomorphological cartography, with an emphasis on morphological representation, where it is possible to verify the position and distribution of these rough features in order to interpret the morphodynamics of the landscape based on landforms that indicate current and past processes. Being carried out through photointerpretation based on aerial photographs (1:25,000), the hummocky features are being checked in the field with the analysis of soil profiles and include currently hypsometric, clinographic and slope orientation mappings, aiming to understand the erosive and pedogenetic processes involved in the morphogenesis and development of these features. At the end of this research, we hope to contribute to the understanding of the processes responsible for the configuration of the landform sculpting on mountainous areas in tropical environments, offering new perspectives on this topic, which is still little explored in geomorphological studies in Brazil.

Key-words: *Morphogenesis; Geomorphological Cartography; Detailed Morphological Cartography.*

Introdução

Os processos morfogenéticos são responsáveis pela formação e configuração do relevo terrestre, esculpindo as diversas feições presentes na paisagem, tais como maciços, planaltos, serras e escarpas, resultantes da interação entre forças internas e externas à crosta terrestre. Os processos endógenos, relacionados às forças internas da Terra, formam estruturas geológicas como montanhas e falhas, enquanto que os processos exógenos referem-se às forças externas que agem sobre a superfície terrestre, como a erosão causada pela água, vento, gelo, bem como a deposição e sedimentação desses materiais transportados pela ação desses agentes (CHRISTOFOLETTI, 1980; COLTRINARI, 2003; ALMEIDA e GUERRA, 2004).

Dessa forma, os processos morfogenéticos representam a interação complexa e contínua entre fenômenos endógenos e principalmente exógenos que moldam e modificam a superfície terrestre ao longo do tempo geológico. Esses processos desgastam e modelam o relevo, criando características geomorfológicas como vales, ravinas e terraços. Dentro da ampla gama de processos que compõem a morfogênese, destaca-se a meteorização ou intemperismo, responsável pela decomposição das rochas e pela formação do regolito; os movimentos do regolito, como rastejamento, fluxos de lama, desmoronamentos e deslizamentos, entre outros; e os processos morfogenéticos pluviais, que desempenham um papel central na escultura das formas da superfície terrestre (TRICART, 1965; CHRISTOFOLETTI, 1980).

Esses processos pluviais, por sua abrangência e impacto significativo na configuração do relevo, têm sido objeto de estudo em diversas obras na ciência geomorfológica, destacando-se autores como Cooke e Doornkamp (1990), Selby (1990 e 1993), Goudie (1990 e 1995), Cunha e Guerra (2003), Baccaro (1999), Christofolletti (2005), Guerra (1999, 2002, 2003 e 2005), Almeida e Guerra (2004) e Morgan (2004). Os autores apontam que a ocorrência de processos como movimentos de massa generalizados e fluxos de detritos são fundamentais na compreensão da evolução do relevo (HAYDEN, 1986; SELBY, 1993).

Autores como Modenesi (1988), Marujo (1994) e Hiruma e Teixeira (2011) identificaram feições deposicionais que sugerem a ocorrência de movimentos de massa pretéritos de grande magnitude em várias áreas da Serra da Mantiqueira. Em sua dissertação de mestrado, Aranha (2011), por meio de fotointerpretação, identificou a presença de feições com aspecto rugoso na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Baú, localizada no município de São Bento do Sapucaí-SP, na Serra da Mantiqueira. A singularidade dessas formas fez com que a autora destacasse a importância de estudos detalhados para compreender a origem dessas feições, sugerindo uma possível relação entre tais feições e movimentos de massa de grande magnitude ocorridos no passado.

Para este estudo, foi escolhida a Bacia Hidrográfica do Córrego do Quilombo (Figura 1), localizada em São Bento de Sapucaí-SP, devido à presença de características semelhantes às identificadas por Aranha (2011). O objetivo principal desta pesquisa é compreender a morfogênese destas feições rugosas na sub-bacia citada, utilizando pressupostos da cartografia geomorfológica de detalhe, por meio de fotointerpretação e geoprocessamento, focando aqui na representação cartográfica desta morfologia que auxiliem o entendimento da dinâmica hidrogeomorfológica a partir de mapas temáticos básicos do terreno e ocorrência das feições citadas.

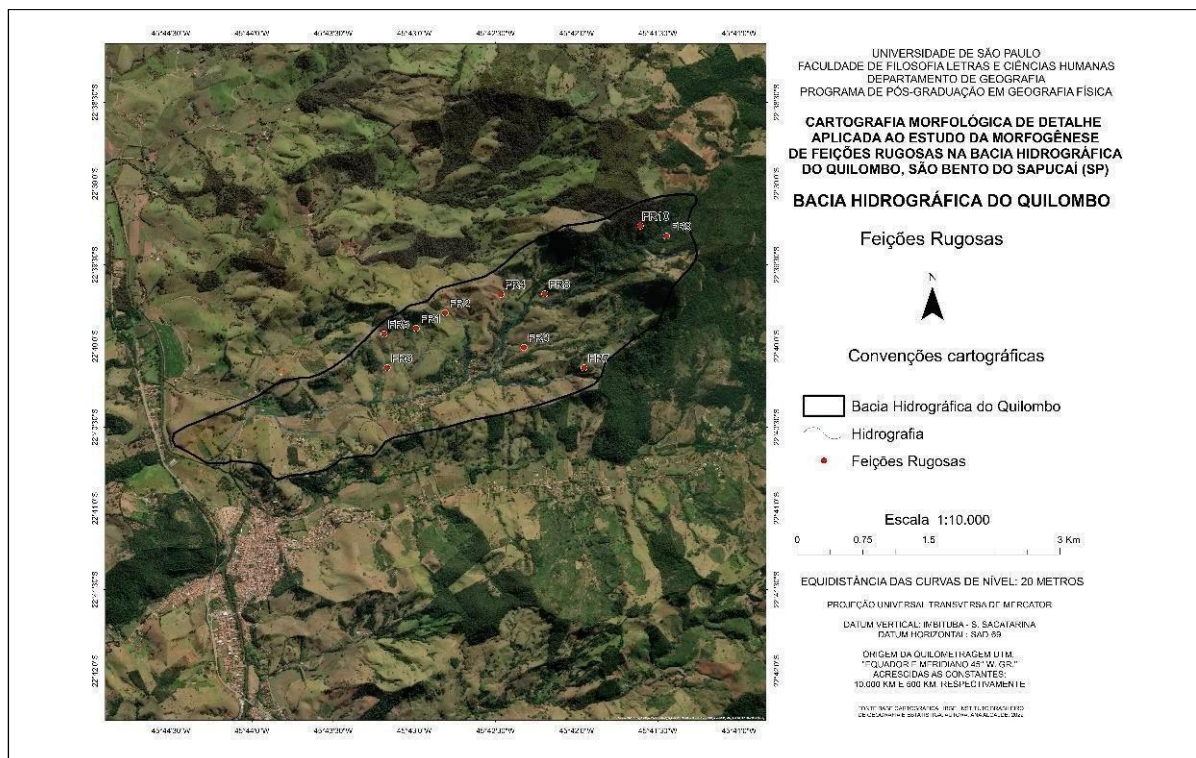


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Quilombo.

Material e Métodos

O mapeamento da morfologia da Bacia Hidrográfica do Córrego do Quilombo foi realizado utilizando fotografias aéreas (1:25.000) do IAC datadas de 1962. Este processo seguiu a metodologia proposta por Savigear (1965), adaptada por Cooke e Doornkamp (1990) para a cartografia geomorfológica de detalhe, com foco na representação morfográfica e morfológica. Inicialmente, foram identificadas as feições rugosas, as quais apresentam uma rugosidade característica quando observadas por estereoscopia. Em seguida, procedeu-se à restituição da rede de drenagem e à identificação das mudanças e rupturas de declives. Aplicou-se a análise estereoscópica da área contida na imagem central de um conjunto de três fotografias aéreas consecutivas (conjunto "stereo-triplet"), todas pertencentes à mesma faixa de voo, com

um recobrimento longitudinal obrigatório superior a 50%. Até o momento, foram utilizadas três fotografias aéreas, com overlay ainda em confecção, verificando-se lineamentos, escarpas, morfologia das vertentes e vales fluviais, rupturas e mudanças de declive, divisores topográficos e colos e também a rede de drenagem (Figura 2).

A caracterização da área de estudos envolveu um levantamento detalhado dos aspectos geomorfológicos envolvendo hipsometria, clinografia e orientação de vertentes, além de estarem sendo explorados outros fatores como aspectos geológicos e pedológicos. Ainda, houve controle, a partir de trabalhos de campo, do mapeamento realizado por meio da fotointerpretação, para futura confecção da carta morfológica de detalhe. Três trabalhos de campo foram realizados, sendo um para o reconhecimento geral da área de estudo e dois para o controle da fotointerpretação e coleta de materiais para caracterização das feições rugosas em áreas amostrais.

A seleção das áreas amostrais foi guiada pela maior representatividade das feições rugosas e pela acessibilidade para análise e coleta de materiais. Foram escolhidas quatro áreas representativas das feições rugosas, onde foram realizadas análises morfológicas detalhadas dos perfis de solo, bem como a coleta de materiais dos diferentes horizontes para análises físicas e químicas, bem como coletas para se obter a densidade do solo e realizar, ainda a confirmar, a datação por Luminescência Opticamente Estimulada (LOE), cujas amostras poderão ser analisadas no Laboratório LEGaL do Instituto de Geociências (IGc) da Universidade de São Paulo (USP).

Resultados e Discussões

A Bacia Hidrográfica do Córrego do Quilombo se destaca na paisagem por sua forma alongada e seu vale bastante assimétrico. Suas margens apresentam características distintas: divisores topográficos retilíneos na margem esquerda e topos serpenteados e descontínuos na margem direita. Os interflúvios seguem a direção NE-SW, exibindo uma variedade de formas, incluindo topos convexos, cristas rochosas e discontinuidades topográficas que dão origem a colos entre os divisores topográficos (Figura 2).



Figura 2. Exemplo do overlay de aerofotointerpretação da morfologia (em andamento) na Bacia Hidrográfica do Quilombo.

Do ponto de vista hipsométrico, cinco classes definem os melhores intervalos para representação da bacia, sendo eles: inferior a 900 metros, entre 900 e 1.020 metros, entre e 1.140 metros, entre 1.140 e 1260 metros e altimetrias acima de 1.260 metros (Figura 3).

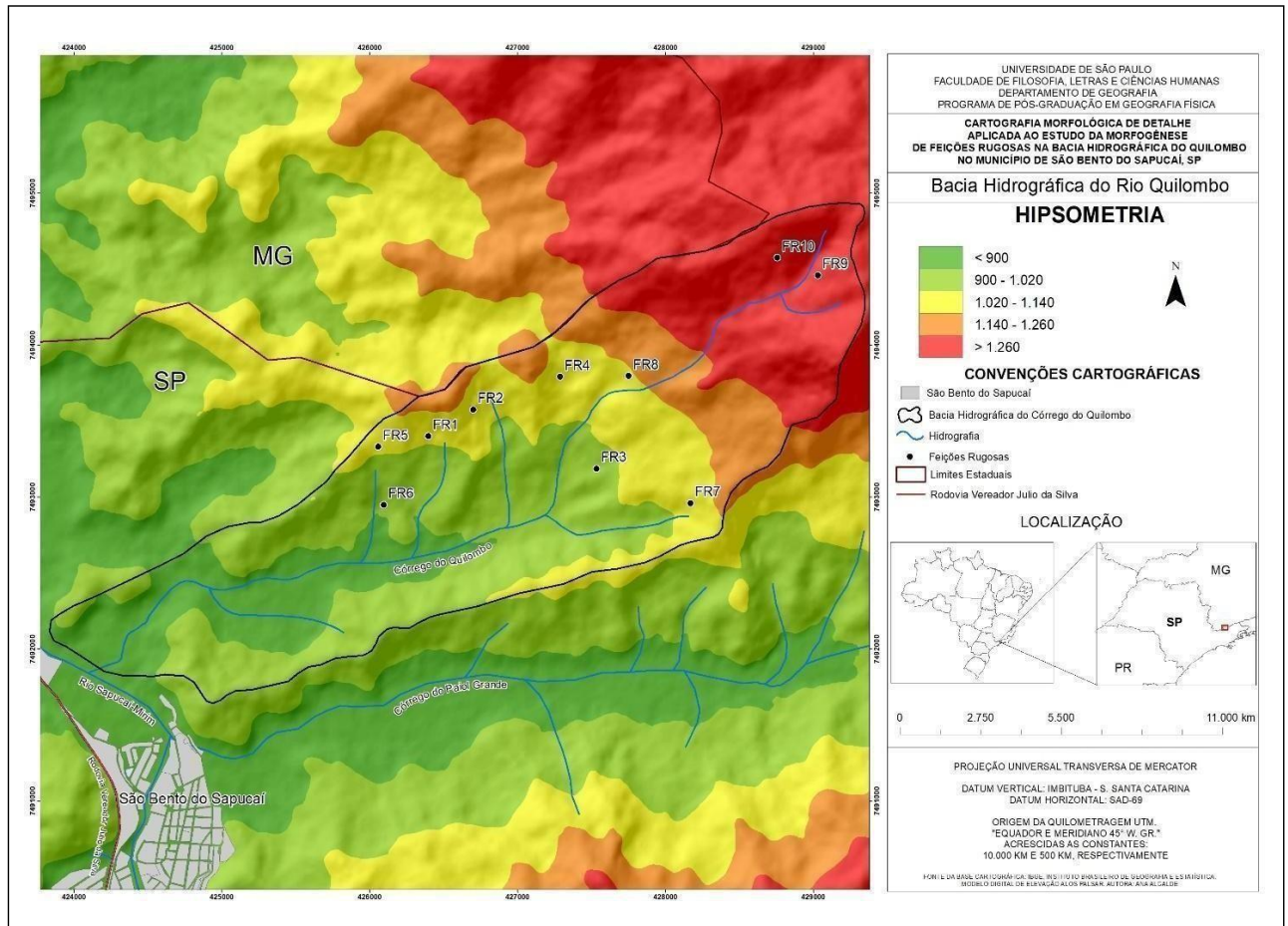


Figura 3. Hipsometria da Bacia Hidrográfica do Quilombo.

A bacia também é caracterizada por fortes declividades, dada seu modelado de relevo movimentado, em especial próximas aos divisores topográficos principais em que ocorrem setores de vertente nitidamente retilíneos. A carta clinográfica permite verificar o domínio de declividades entre 12 e 24° na margem direita no domínio dos interflúvios, enquanto que na margem esquerda predominam declividades de 24 a 30° em vertentes retilíneas. Esse contraste da clinografia entre as margens da bacia reflete sua assimetria, além de evidenciar planície fluvial que, embora restrita (compartimentada), caracteriza vale de fundo plano (Figura 4). O mesmo vale para a orientação de vertentes, que mostra maior variação na margem esquerda da bacia para, na margem direita, ser dominada pelas orientações Norte e Noroeste (Figura 5), o que confere a evidente assimetria desta sub-bacia tributária do Rio Sapucaí-Mirim (Figura 6).

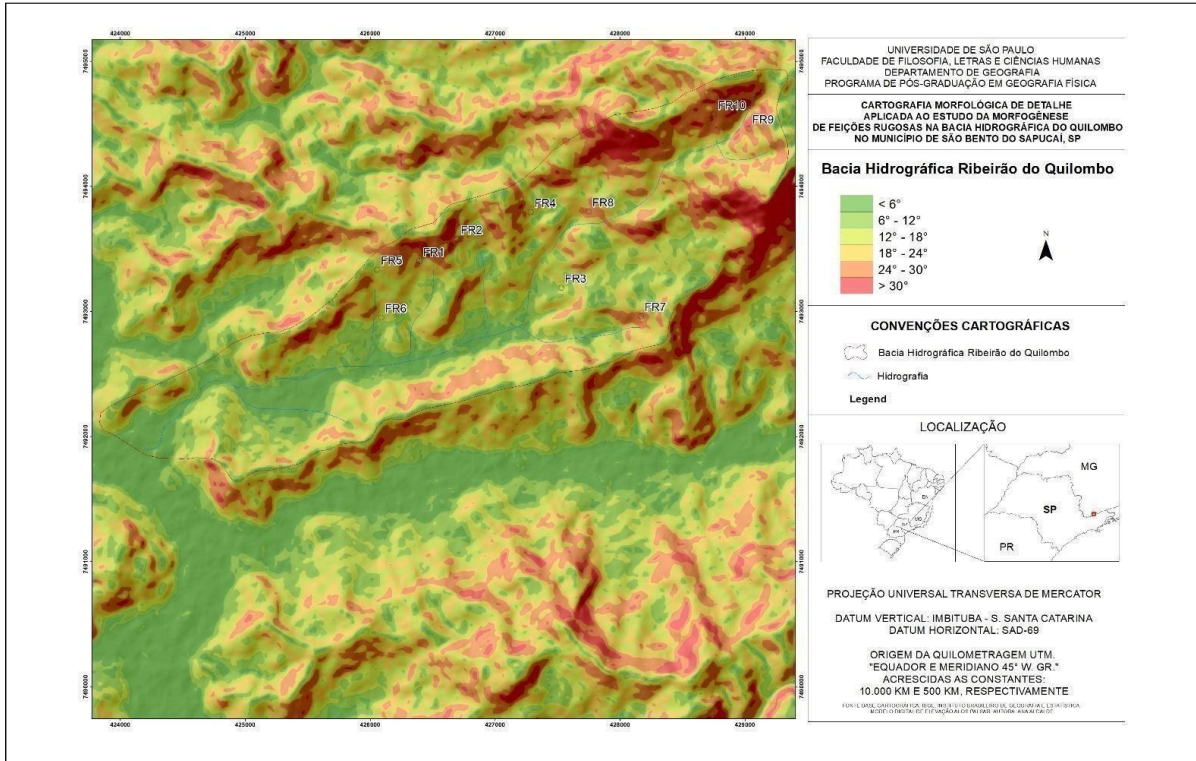


Figura 4. Declividades da Bacia Hidrográfica do Quilombo.

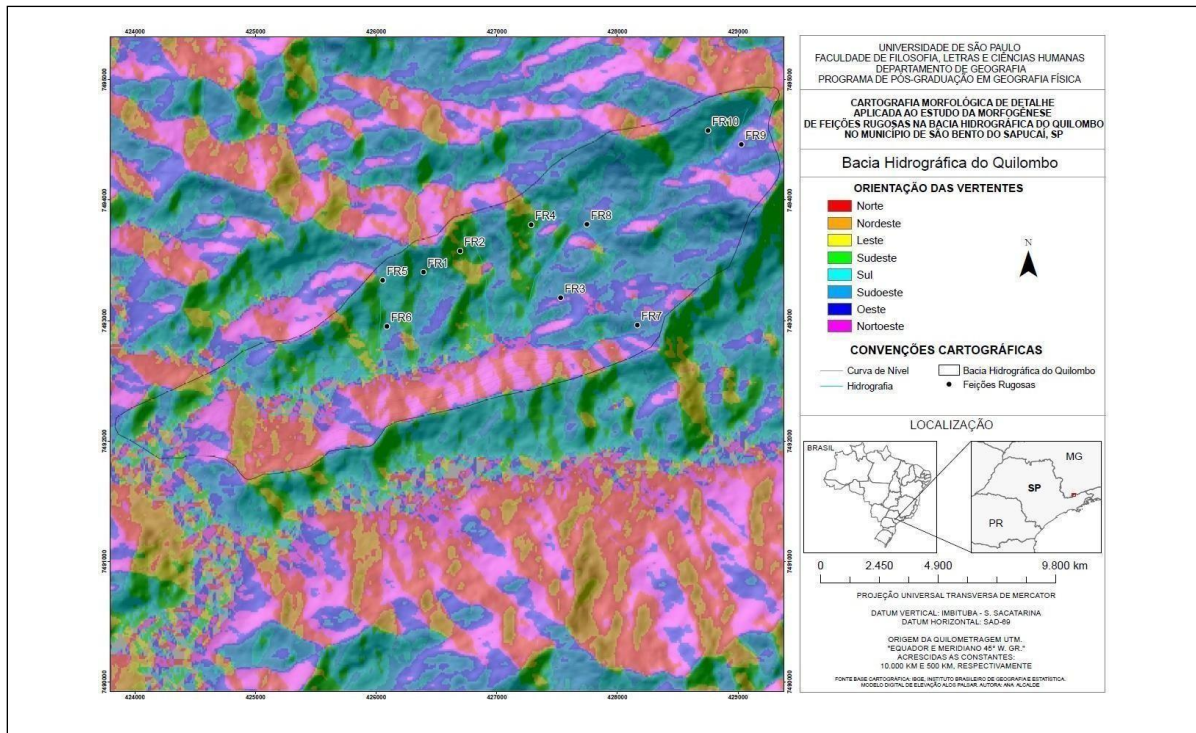


Figura 5. Declividades da Bacia Hidrográfica do Quilombo.



Figura 6. Destaque para a assimetria das margens da Bacia Hidrográfica do Quilombo.

A assimetria da bacia hidrográfica também é expressa pela diferença na extensão das encostas – aproximadamente 1.000 m nas vertentes da margem direita e 500 m nas margens à esquerda. Além disso, nos interflúvios da margem direita as altitudes são ligeiramente maiores, mas tendem a diminuir a jusante.

Nas margens à esquerda nota-se o desenvolvimento do padrão de drenagem paralelo, comum às áreas de elevada declividade com controle estrutural do relevo; em contraste, as vertentes da margem direita possuem padrão dendrítico, caracterizado pelos ângulos agudos de gradação variada que os tributários fazem na bifurcação com o canal principal.

Como pode ser visto na Figura 5, cerca de 80% das feições rugosas estão acima de 1.020 m de altitude, com a maior parte delas em vertentes orientadas de Sudoeste a Sudeste, apresentando concentração, sobretudo, em áreas com declividade superior a 24°, em altitudes de 1.020 m a 1.140 m. Essas características estão intimamente ligadas às morfologias côncavas da vertente, precedidas por rupturas de declive convexas em áreas esculpidas em anfiteatro. Além disso, parecem estar diretamente relacionadas à formação das cabeceiras de drenagem e ao processo remontante, desempenhando um papel crucial na ocorrência de movimentação de massa nas encostas.

Neste cenário, as feições rugosas ocorrem tanto em vertentes côncavas como vertentes convexas e retilíneas, aparentemente ligadas a cicatrizes de escorregamento antigas que foram recobertas por sedimentos ou vegetação. Majoritariamente, se localizam nas vertentes da margem direita, da média à alta

vertente, denunciando estarem estas ligadas às maiores faixas altitudinais com declividades mais acentuadas e exposição às frentes frias vindas de Sul e Sudeste. No entanto, embora não tenha ocorrência expressiva nas vertentes da margem esquerda da bacia, há de se apontar que outras feições erosivas aparecem concordantes aos lineamentos de direção NE-SW verificados na aerofotointerpretação, o que pode indicar a possível presença de feições rugosas ainda não verificadas que dependem de estudos posteriores.

Considerações Finais

A pesquisa visa fornecer uma contribuição significativa para a compreensão dos processos que influenciam a formação do relevo de regiões montanhosas em meio tropical, partindo das feições rugosas como um aspecto-chave. Essas feições não apenas refletem os processos que moldaram o relevo ao longo do tempo geológico, mas também fornecem indicações sobre a interação complexa entre fatores endógenos e exógenos que influenciam a evolução da paisagem. Do ponto de vista da cartografia geomorfológica de detalhe, pode ser indicado que a aerofotointerpretação e a confecção de mapas temáticos permitem associações que, no caso, possibilitam apontar um caminho para a interpretação de processos erosivos e pedogenéticos envolvidos na morfogênese e desenvolvimento dessas feições.

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da USP (PPGF) e à CAPES pelo suporte financeiro fornecido, que viabilizaram a realização deste estudo. Além disso, gostaríamos de estender nossos agradecimentos ao Grupo de Pesquisa Nostradamos por proporcionar um ambiente colaborativo e enriquecedor para a troca de ideias e discussões construtivas. Por fim, reconhecemos e agradecemos a todos que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho, com destaque para o Prof. Dr. Marcos Roberto Pinheiro (PPGF).

Referências

ALMEIDA, F.G. GUERRA, A.J.T. Erosão dos Solos e Impactos Ambientais na Cidade de Sorriso (Mato Grosso). In: Impactos Ambientais Urbanos no Brasil. A.J.T. Guerra e S.B. Cunha (orgs.) Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2ª edição, 2004, p. 365-391.

- ARANHA, R.D. Estudo morfológico da bacia do Ribeirão do Baú – São Bento do Sapucaí – SP. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- BACCARO, C.A.D. Processos Erosivos no Domínio do Cerrado. In: Erosão e Conservação dos Solos – Conceitos, Temas e Aplicações. A.J.T. Guerra, A.S. Silva e R.G.M. Botelho (orgs.). Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1999, p. 195-227.
- CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. 2ª edição, São Paulo, Edgard Blücher. 1980, 149p.
- CHRISTOFOLETTI, A. Aplicabilidade do Conhecimento Geomorfológico nos Projetos de Planejamento, In: Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos. Guerra, A.J.T. (orgs.) e Cunha, S.B. (orgs.) Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 6ª edição, 2005, p. 415-441.
- COLTRINARI, L. Evolução Geomorfológica do Planalto de São José dos Campos (SP). Tese de Livre Docência, Dept. de Geografia, FFLCH/USP. São Paulo, 2003.
- COOKE, R. U. & DOORNKAMP, J. C. Geomorphology in Environmental Management – An Introduction. Oxford, Oxford University Press, 2ª edição, 1990, 410p.
- CUNHA, S.B. & GUERRA, A.J.T. A Questão Ambiental: Diferentes Abordagens (orgs.). Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2003, 224p.
- GOUDIE, A. The Human Impact on the Natural Environment. Oxford, Basil Blackwell Ltd., 1990, 388p.
- GOUDIE, A. The Changing Earth – Rates of Geomorphological Processes. Oxford, Blackwell Publishers, 1995, 302p.
- GUERRA, A.J.T. O Início do Processo Erosivo. In: Erosão e Conservação dos Solos – Conceitos, Temas e Aplicações. A.J.T. Guerra, A.S. Silva e R.G.M. Botelho (orgs.). Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1999, p. 15-55.
- GUERRA, A.J.T. Processos Erosivos nas Encostas. In: Geomorfologia – Exercícios, Técnicas e Aplicações. S.B. Cunha e A.J.T. Guerra. (orgs.). Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2ª Edição, 2002, p. 139-155.
- GUERRA, A.J.T. Encostas e a Questão Ambiental. In: A Questão Ambiental – Diferentes Abordagens. S.B. Cunha e A.J.T. Guerra. (orgs.). Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2003, p. 191-218.
- GUERRA, A.J.T. Processos Erosivos nas Encostas. In: Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 6ª edição, 2005, 472p.
- HAYDEN, R. S. Geomorphological Mapping in: SHORT, N. M. & BLAIR Jr., R. W (eds) Geomorphology from space. NASA, Washington DC, 1986. p. 637-656. Disponível em <<http://disc.gsfc.nasa.gov/geomorphology/>>, acessado em dezembro de 2020.

- HIRUMA, S.T.; TEIXEIRA, A.L.; Pedra do Baú, São Bento do Sapucaí, SP – Imponente paisagem e registro de eventos tectônicos e denudacionais pós-ruptura continental. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S.; Berbert-Born, M.; Sallun filho, W.; Queiroz, E.T.; (Edit.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil, 2011. Acessado em: <http://sigep.cprm.gov.br/sitio055/sitio055.pdf>. Monumento geológico da Pedra do Baú, São Bento do Sapucaí – SP (Processo SMA NIS 1577483) – 8.423/2010.
- MARUJO, M.F. Estudo morfológico de uma bacia de drenagem nas escarpas do Planalto de Campos do Jordão, Serra da Mantiqueira, SP. 1994. 146 p. Dissertação de mestrado. São Paulo, 1994.
- MODENESI, M.C. 1988. *Quaternary Mass Movements in a Tropical Plateau (Campos do Jordão – São Paulo)* Zeitschrift für Geomorphologie. 32 (4): 425-440.
- MORGAN, R.P.C Soil Erosion and Conservation. England, Blackwell Publishing, 3ª edição, 2005, 304p.
- SAVIGEAR, R. A. G. A technique of morphological mapping. Annals Ass. American Geographers, 55, 1965, p. 514-538.
- SELBY, M.J. Hillslope Materials and Processes. Oxford, Oxford University Press, 1990, 264p.
- SELBY, M.J. Hillslope Materials and Processes. Oxford, Oxford University Press, 2ª edição, 1993, 451p.
- TRICART, J. La cartographie Geomorphologique Détaillée in Principes et Methodes de la Geomorphologie. Masson et Cie. Editeurs, Paris, 1965, p.182-233.

Linha de Pesquisa: Estudos interdisciplinares em Pedologia e Geomorfologia**INFLUÊNCIAS NEOTECTÔNICAS NA FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DO DELTA
BREVES/BOIUÇU, SUDOESTE DA ILHA DE MARAJÓ – PA**Helen Machado¹, Fernando Nadal Junqueira Villela¹, Marcos Pinheiro¹¹Universidade de São Paulo, Departamento de Geografiahelengraciane@usp.br**Resumo**

Formações fluviais costeiras têm tido sua gênese comumente associada apenas às mudanças do nível médio do mar ocorridas no Quaternário, como é o caso do delta Breves/Boiuçu, localizado a Sudoeste da Ilha de Marajó, no Norte do Brasil. O delta em questão teria sido formado durante a regressão marinha ocorrida por volta de 5000 anos AP. Porém, registros de estruturas tectônicas em ambientes de sedimentação Holocênica sugerem que reativações vêm ocorrendo desde o Mioceno, como no Arco do Gurupá. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar as possíveis influências neotectônicas na formação do delta Breves-Boiuçu. Para atingir este objetivo, foi realizada a detecção semiautomática de lineamentos estruturais. Tais lineamentos foram identificados em dados pré-processados da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), por meio do software SID3. Além disso, foram mapeadas anomalias de drenagem, considerando que são indicativas de controle tectônico na rede fluvial. Por fim, foi analisada a possível variação de tamanho do delta nos últimos 30 anos, avaliando sua taxa de progradação por meio de imagens de satélite (Landsat 7 e Sentinel2). Os resultados da análise dos domínios dos lineamentos nas escalas regional e local apontam para dois possíveis modelos tectônicos. De acordo com o primeiro modelo, o corredor de cisalhamento dextral E-W caracteriza a área investigada com orientação Shmax NW-SE. Falhas normais, juntas e fraturas em T seguem esta última orientação, enquanto as estruturas mapeadas E-W e N-S correspondem, respectivamente, a falhas Y (dextrais) e X (sinistrais). No segundo modelo, existe uma zona de cisalhamento dextral orientada NE-SW, e as estruturas E-W correspondem a fraturas T, enquanto as estruturas N-S são falhas P dextrais. A análise das anomalias de drenagem e paleocanais na área de estudo mostrou que a rede de drenagem é tectonicamente controlada, apresentando drenagem retilínea, vale assimétrico, cotovelos e ângulo de junção em 90°. Além disso, foi identificado um paleocanal que indica a existência de um antigo paleodelta entre o rio Pará e o rio Amazonas. As alterações da linha de costa do Delta mostraram que, no intervalo de 33 anos (1986 – 2019), o delta progrediu em sua parte frontal e sofreu erosão na zona distributária. Com base nos resultados do mapeamento de anomalias de drenagem e paleocanal, podemos inferir que há um possível paleodelta entre os rios Pará e Amazonas. Esse paleodelta foi formado não apenas como resultado de mudanças no nível do mar, mas também devido a uma forte influência neotectônica, que alterou a dinâmica fluvial, favorecendo a formação de um novo delta, o delta Breves-Boiuçu, ativo nos últimos 30 anos.

Palavras-chave: *Geomorfologia Fluvial; Neotectônica; Delta do Amazonas.*

Research Line: Interdisciplinary studies in Pedology and Geomorphology

**NEOTECTONIC INFLUENCES ON THE FORMATION AND EVOLUTION OF
THE BREVES/BOIUÇU DELTA, SOUTHWEST MARAJÓ ISLAND – PA**

Helen Machado¹, Fernando Nadal Junqueira Villela¹, Marcos Pinheiro¹

¹University of Sao Paulo, Department of Geography

helengraciane@usp.br

Abstract

The genesis and formation of river features in the Amazon River (Northern Brazil) have been commonly associated only with changes in the mean sea level that occurred in the Quaternary. In addition, there are still few works that take into account the possible influence of Neotectonics in the formation of these features, such as the Delta Breves-Boiuçu, in the mouth of the Amazon River, located in the southwestern part of the Marajó Island. This delta would have been formed during a marine regression occurred around 5,000 years BP. However, records of tectonic structures in Holocene sedimentary environments suggest that reactivations have occurred since the Miocene. In this sense, based on the hypothesis that the Delta Breves-Boiuçu developed by the contribution of sedimentary input from Caxiuanã and Melgaço bays, the aim of this work is to understand the delta dynamics and comprehend its Quaternary evolution, considering the coastline development according to its progradations and the (Neo) tectonic controls exerted in the area. The result analysis of lineament domains at regional and local scales point to two possible tectonic models. According to the first model, the E-W dextral shear corridor characterizes the investigated area with S_{max} NW-SE orientated. Normal faults, joints, and T-fractures follow this last orientation, whereas the mapped E-W and N-S structures correspond, respectively, to Y (dextral) and X (sinistral) faults. In the second model, there is a dextral shear zone NE-SW oriented, whose E-W structures correspond to T fractures, whereas the N-S structures are dextral P faults. The analysis of drainage anomalies and paleochannels in the study area shows that the drainage network is controlled by tectonic activity, forming rectilinear drainages, asymmetrical valleys, elbows and 90° junction angles. In addition, we identified a paleochannel that points to the existence of an ancient paleodelta between the Pará and Amazon Rivers, besides the evidence of river captures in the main bays that supply sediments to the current delta. The Delta coastline changes showed that the delta suffered progradations in its frontal part and erosion in the distributary zone in the 33-year interval (1986 - 2019). Based on the results, it is possible to infer that there is a paleodelta between the Pará and Amazonas rivers. Such delta was abandoned due to river captures occurred in the Caxiuanã and Melgaço bays, resulting from the action of the E-W dextral shear corridor after reactivation of the Arch of Gurupá. After the abandonment of the paleodelta, the Delta Breves-Boiuçu was formed on the north of the Melgaço Bay, which has been behaving actively over the last 30 years.

Key-words: *Fluvial Geomorphology; Neotectonics; Amazon Delta.*

Introdução

Registros sobre eventos transgressivos e regressivos do Quaternário têm sido estudados em todo o litoral brasileiro (SUGUIO et al., 1985), em especial na Ilha de Marajó, localizada na foz do Rio Amazonas (Norte do Brasil). No leste dessa ilha, foram caracterizados em seu paleoestuário depósitos formados nos eventos transgressivos do Holoceno (i.e. ROSSETTI e PESSENDA, 2010) e depósitos classificados como materiais bioturbados com forte influência marinha, nas proximidades de uma feição deltaica (TATUMI et al., 2008). Para Ab'Saber (2006), que denomina tal feição como delta Breves/Boiuçu, sucessivos eventos de transgressão e regressão marinha teriam favorecido a formação da paisagem deltaica no sudoeste da Ilha. Para este autor, os paleovales referentes às baías de Caxiuanã e Melgaço (Figura 1) teriam sido entalhados entre 23.000 e 13.000 A.P., quando o mar estava 100 m abaixo do nível atual. Posteriormente, entre 12.700 e 5.500 anos A.P., o nível do mar iniciaria uma ascensão, que culminou no alteamento de 3 m acima de seu nível médio atual, ocasionando o afogamento dos paleovales. Finalmente, após a regressão marinha, no período do optimum climático, entre 5 e 6 mil anos A.P., o delta teria sido formado.

Apesar de grande influência marinha, estudos geológicos, geomorfológicos e paleoclimáticos da região amazônica (i.e. DAMUTH e FLOOD, 1984; DRISCOLL e KERNER, 1994; MANTELLI e ROSSETTI, 2009; CAPUTO e SOARES, 2016) sugerem que tanto a atividade neotectônica como as variações climáticas cenozóicas, especialmente quaternárias, teriam causado muitas das grandes mudanças ocorridas desde o Mioceno na foz do Rio Amazonas. O delta Breves/Boiuçu seria testemunho de tais mudanças que, de acordo com Ab'Saber (2006), caracterizaria uma paisagem remanescente do afogamento dos paleovales e ainda teria causado um efeito tampão de assoreamento em um possível canal que interligava o rio Amazonas ao rio Pará.

Áreas em subsidência favorecem tanto a formação como a progressão do ambiente deltaico por um processo de deslocamento lateral dos lóbulos sedimentares, indicando uma dinâmica ativa (SUMMERFIELD, 1996, BESSET et al., 2019). Nesse contexto, o delta Breves-Boiuçu está situado em uma grande área de subsidência relacionada ao sistema de rifts do graben de Marajó, formado durante a abertura do Oceano Atlântico, no Cretáceo Superior (SUGUIO, 1999; VILLEGAS, 1994; CAPUTO e SOARES, 2016).

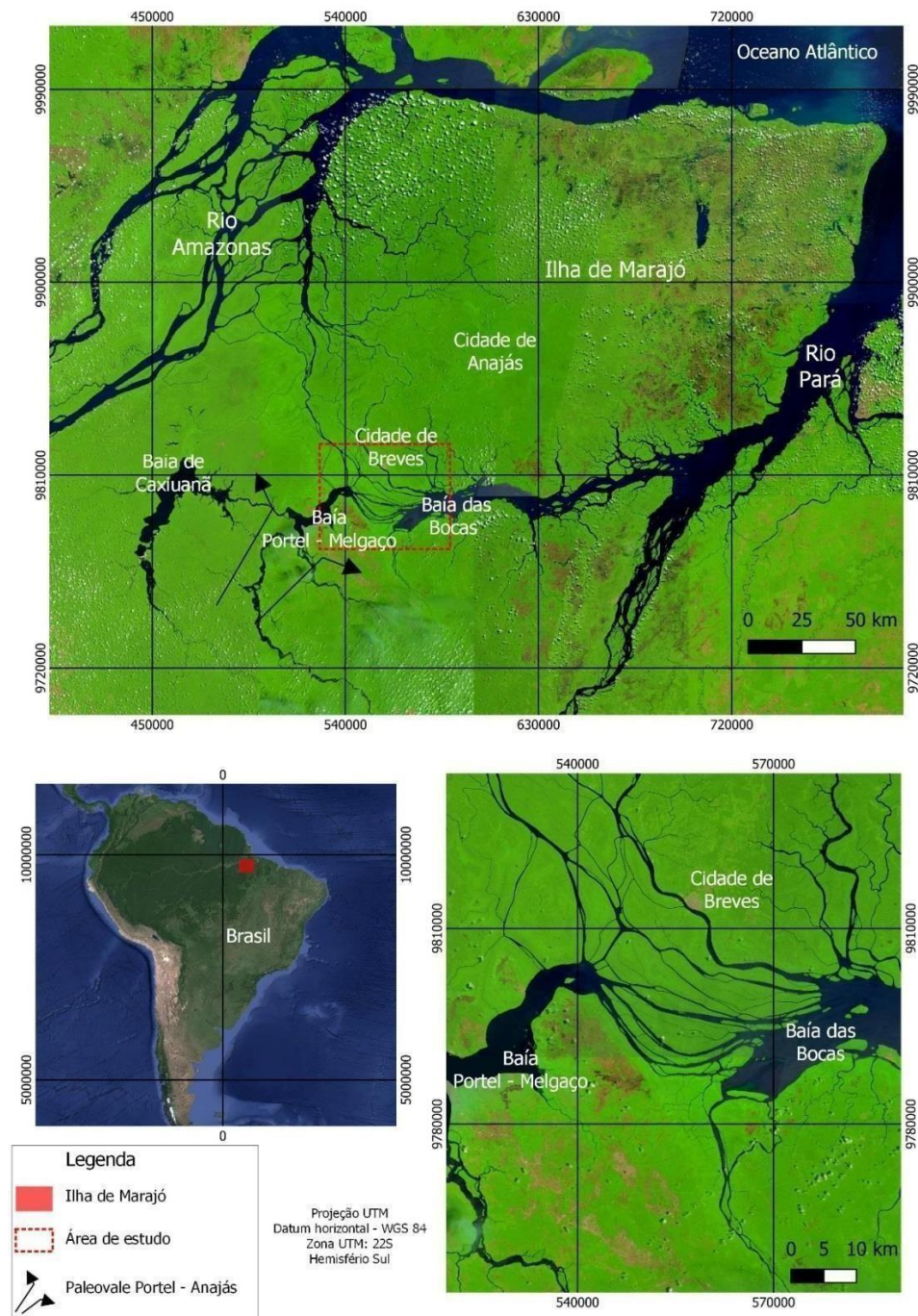


Figura 1. Localização da área de estudo e do delta Breves – Boiuçu.

A estrutura em graben deu origem à bacia sedimentar de Marajó, dividida nas sub- bacias do Limoeiro, Mexiana, Cameté e Mocajuba (Figura 2), compostas por um conjunto de rifits associados a falhas normais com orientação NW-SE (AZEVEDO, 1991; VILLEGAS, 1994; MANTELLI e ROSSETTI, 2009) e falhas transcorrentes ENE-WSW e NE-SW (VILLEGAS, 1994; COSTA et al., 2001). O graben seria limitado por uma faixa anticlinal que divide a bacia Amazônica central da bacia de Marajó, sendo o seu

rebordo/ressalto (rift da bacia de Marajó) denominado de Arco de Gurupá (COSTA et al., 2001; CAPUTO e SOARES, 2016). O Arco de Gurupá não teria sofrido grande rebaixamento 40 Ma após a formação do rift (CAPUTO e SOARES, 2016). A estrutura sinclinal teria sido reativada após o desequilíbrio isostático causado pelo leque subaquático na foz do rio Amazonas, cujos depósitos indicam que grande parte da coluna litoestratigráfica teria sido depositada após o Mioceno Médio, em resposta à elevação Andina (DAMUTH e FLOOD, 1984).

Partindo do pressuposto que o soerguimento ou reativação do arco poderia ter causado influências anteriores ao Quaternário na região do delta Breves-Boiuçu, a hipótese deste trabalho é: (a) a região deltaica seria mais antiga do que sugerido por Ab'Saber (2006), para quem o delta teria entre 5 e 6 mil anos; (b) a gênese do delta estaria relacionada também à Neotectônica (regime tectônico vigente desde o Mioceno, de acordo com HASUI, 1990, e SAADI, 1993), em contraponto à hipótese exclusivamente climática estabelecida pelo geógrafo. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é compreender a dinâmica do delta e entender a sua evolução Quaternária, assim como a evolução da linha de costa do delta segundo suas progradações, e também avaliar os controles neotectônicos exercidos na área e sua possível influência na evolução do delta.

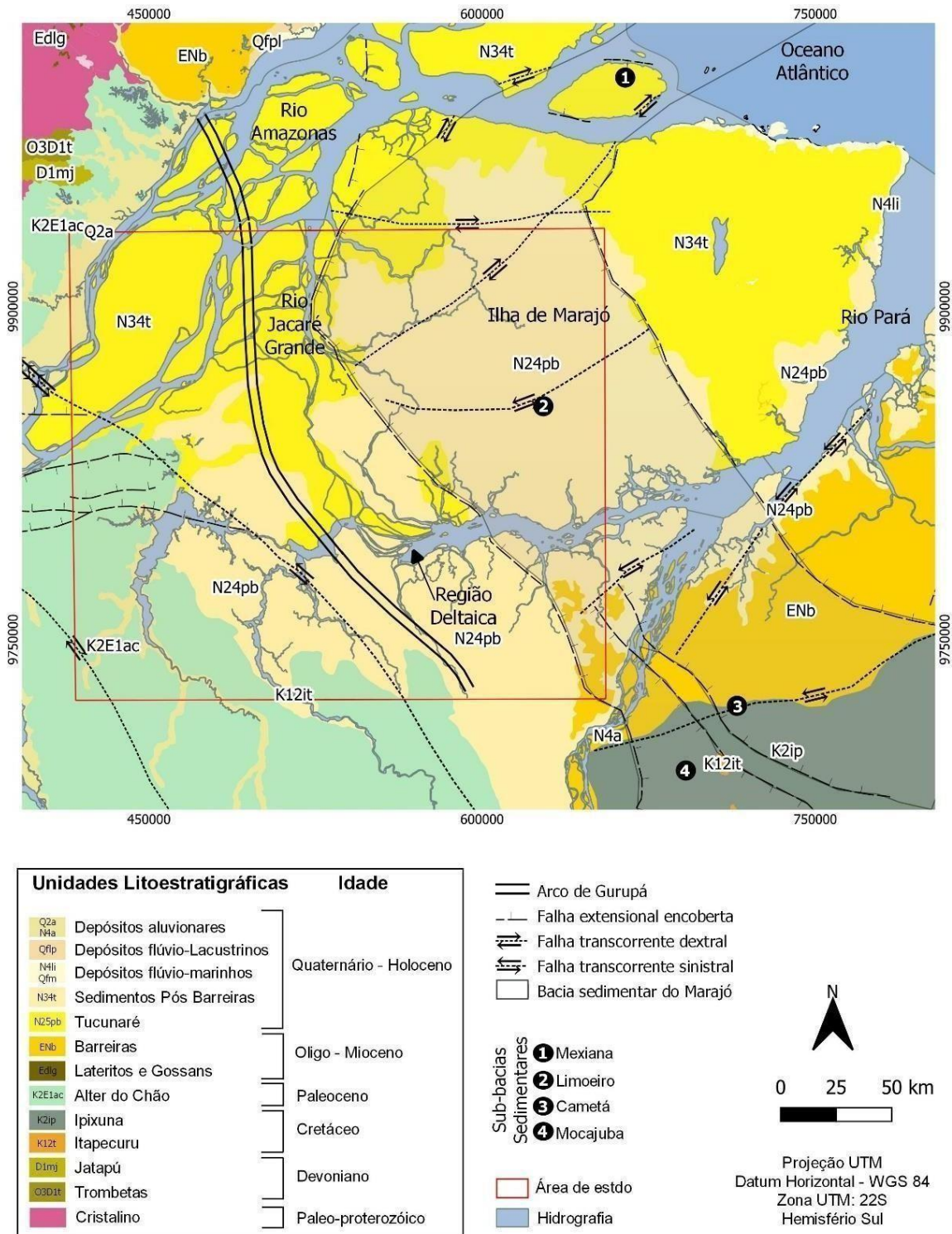


Figura 2. Representação das unidades litoestratigráficas e principais estruturas que compõe a área de estudo. Modelo baseado em Azevedo (1991), Villegas (1994), Mantelli e Rossetti (2009), CPRM (2010) e Rossetti et al. (2012).

Material e Métodos

Inicialmente, na escala regional, foi realizado o mapeamento dos domínios de lineamentos estruturais da área. Esse levantamento foi feito sob os dados topográficos (30 m de resolução espacial) da SRTM (Shutter Radar Topographic Mission). Esses dados foram tratados no software ENVI, por meio do qual, primeiramente, foi feita a redução da resolução espacial da imagem para 90 m. Em seguida, foram geradas imagens sombreadas submetidas a diferentes condições de iluminação, 0°, 45°, 90°, 135°, conforme proposto por Wise et al. (1985). Para cada condição de iluminação, foi ressaltado o relevo em uma elevação de 20 m, resultando no relevo sombreado. Seguindo a proposta de Cianfarra e Salvini (2015) e Cianfarra et al. (2022), foram aplicados os filtros “low pass” e “high pass”. A imagem final foi salva em formato bmp, com resolução de 2 bit. Essa imagem foi importada no software SID3, de autoria do Professor Francesco Salvini, vinculado à Università Degli Studi Roma Tre (Itália), por meio do qual foram detectados de forma automática os lineamentos estruturais. Os principais parâmetros inseridos no software para estabelecer as características dos lineamentos a serem mapeados foram: 1) Comprimento mínimo e máximo do lineamento: 5 a 200 km; 2) largura do lineamento: 270 m; 3) taxa de suavização ou generalização ao longo do lineamento potencial: 3 pixels; 4) Comprimento mínimo e máximo de cada segmento de lineamento: 3 pixels; 5) Distância máxima entre segmentos de lineamentos que pertencem ao mesmo lineamento: 1 pixel.

Os lineamentos mapeados foram analisados estatisticamente no software Daisy (Salvini et al., 1999) por meio de uma análise polimodal, sendo que cada direção preferencial encontrada é equivalente a um domínio de lineamentos. A direção principal de domínio de lineamentos deve corresponder à orientação da compressão máxima horizontal (Sh_{max}) conforme a proposta de Wise (1982), aplicada em Cianfarra e Salvini (2015) e Pinheiro et al. (2019). Os dados mapeados foram confrontados com a localização e magnitude dos sismos ocorridos na região entre 1977 e 2021. Esses dados foram revisados e fornecidos pelo Centro de Sismologia do Instituto Astronômico e Geofísica da Universidade de São Paulo/Brasil.

Com o intuito de avaliar o provável controle tectônico dessas estruturas no sistema fluvial, foi realizado o mapeamento das anomalias de drenagem. Este levantamento foi baseado no trabalho clássico de Howard (1967) e, sobretudo, na proposta de Panizza et al. (1987) para mapeamento morfotectônico com a adaptação da legenda proposta por Pinheiro (2014). Os itens mapeados são: drenagem retilínea, cotovelo, cotovelo duplo, confluência em 90°, confluência discordante, assimetria no padrão de drenagem e paleovales.

Finalmente, foi feita uma análise quantitativa da variação da linha de costa do delta nos últimos 30 anos, a fim de avaliar a sua possível taxa de progradação/erosão, conforme a proposta de Besset et al.

(2019). Essa análise permitiu verificar as áreas em que houve maior aumento ou diminuição da área, possibilitando estabelecer correlações com o fornecimento sedimentar da bacia de drenagem. Para isso, foram utilizadas as imagens de satélite Landsat 5 e 8, dos anos de 1986 e 2020, sendo, respectivamente, as resoluções espaciais de 30 e 15 m. A seleção das imagens foi baseada na informações das tábuas de marés de 1986 a 2020 fornecidas pela Marinha do Brasil.

As imagens foram tratadas no software ArcGIS utilizando as combinações entre as bandas 4 e 5 do infravermelho próximo e a banda 7 do infravermelho médio. O limite do delta foi mapeado de forma manual, em ambiente SIG, na escala 1:8.000. Para a definição da linha de costa, foram desconsiderados potenciais marcadores sujeitos a ações instantâneas, diárias ou flutuações relacionadas a eventos, como zonas de oscilação ou pontas de bancos de areia submersos.

Resultados e Discussões

O resultado dos domínios de lineamentos e das suas direções preferenciais apontam para a existência de dois grandes domínios na área, N-S e E-W (Figura 3), sendo o primeiro o provável domínio principal, considerando o maior número de lineamentos e o menor desvio padrão (21.99°). Com base nisso, podem ser propostos dois possíveis modelos tectônicos (Figura 4). O primeiro seria de um corredor de cisalhamento principal com orientação E-W, cuja cinemática seria dextral, decorrente da compressão regional (Shmax) de orientação NW-SE. Paralelas a esta última orientação estariam as falhas normais, juntas e fraturas T, enquanto que as estruturas E-W e N-S mapeadas corresponderiam, respectivamente, a falhas Y (dextrais) e X (sinistrais). Tal modelo é compatível com Villegas (1994), que analisou linhas sísmicas na sub-bacia de Limoeiro, e com Costa et al. (2001), que considerou as falhas normais como conjuntos antigos de falhas, e eventos mais recentes como aqueles relacionados às transcorrências dextrais de orientação E-W ligadas à falhas normais de orientação NW-SE. Já no segundo modelo, a zona de cisalhamento seria dextral NE-SW e as estruturas E-W corresponderiam às fraturas T, enquanto que as estruturas N-S seriam as falhas inversas; neste modelo, de acordo com a proposta de Wise (1985), o Shmax seria E-W, paralelo à direção principal dos lineamentos, dado compatível com o estudo de Assumpção et al. (2016), para quem a compressão máxima regional segue essa mesma orientação.

Frequency Gaussians
 Tot.Data: 4196 h-max: 79 h-min: 11 h-mean: 46.622 Mean: 42.222 SD: 5.113 Mode: -88.000

RMS = 3.71064546053177

GAUSSIAN PARAMETERS					
#	%	Nor. H.	Max H.	Azimuth	sd
1	94.57	100.00	59.95	5.036°	21.99°
2	97.81	95.77	57.41	82.38°	23.75°
3	10.11	32.66	19.58	-46.79°	7.2°

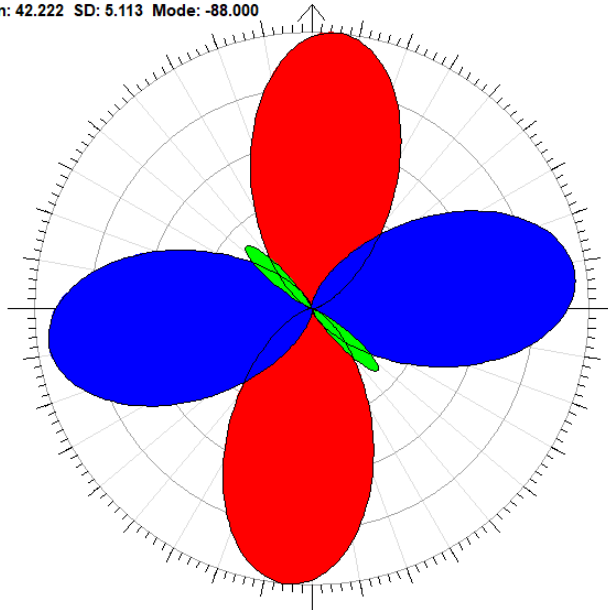
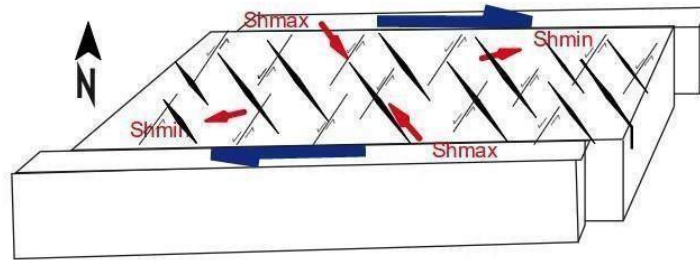


Figura 3. Roseta com os resultados consolidados da detecção dos lineamentos estruturais.

A) Primeiro modelo tectônico : Corredor de cisalhamento E-W



B) Segundo modelo tectônico : Corredor de cisalhamento NE-SW

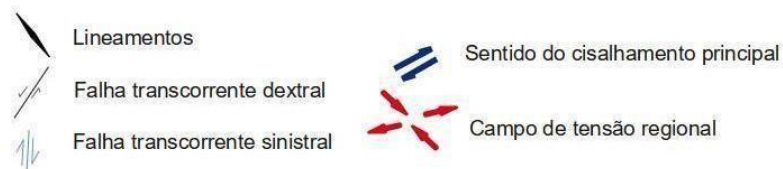
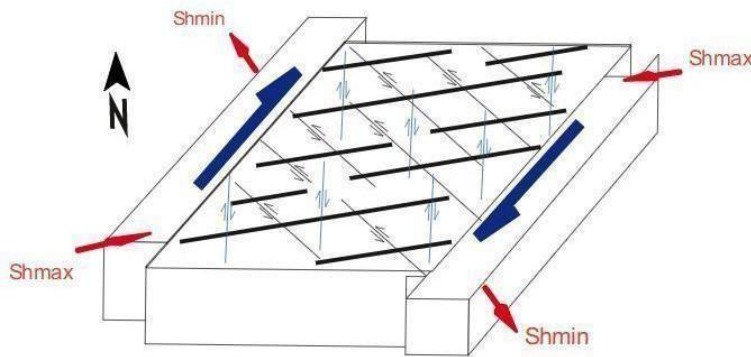
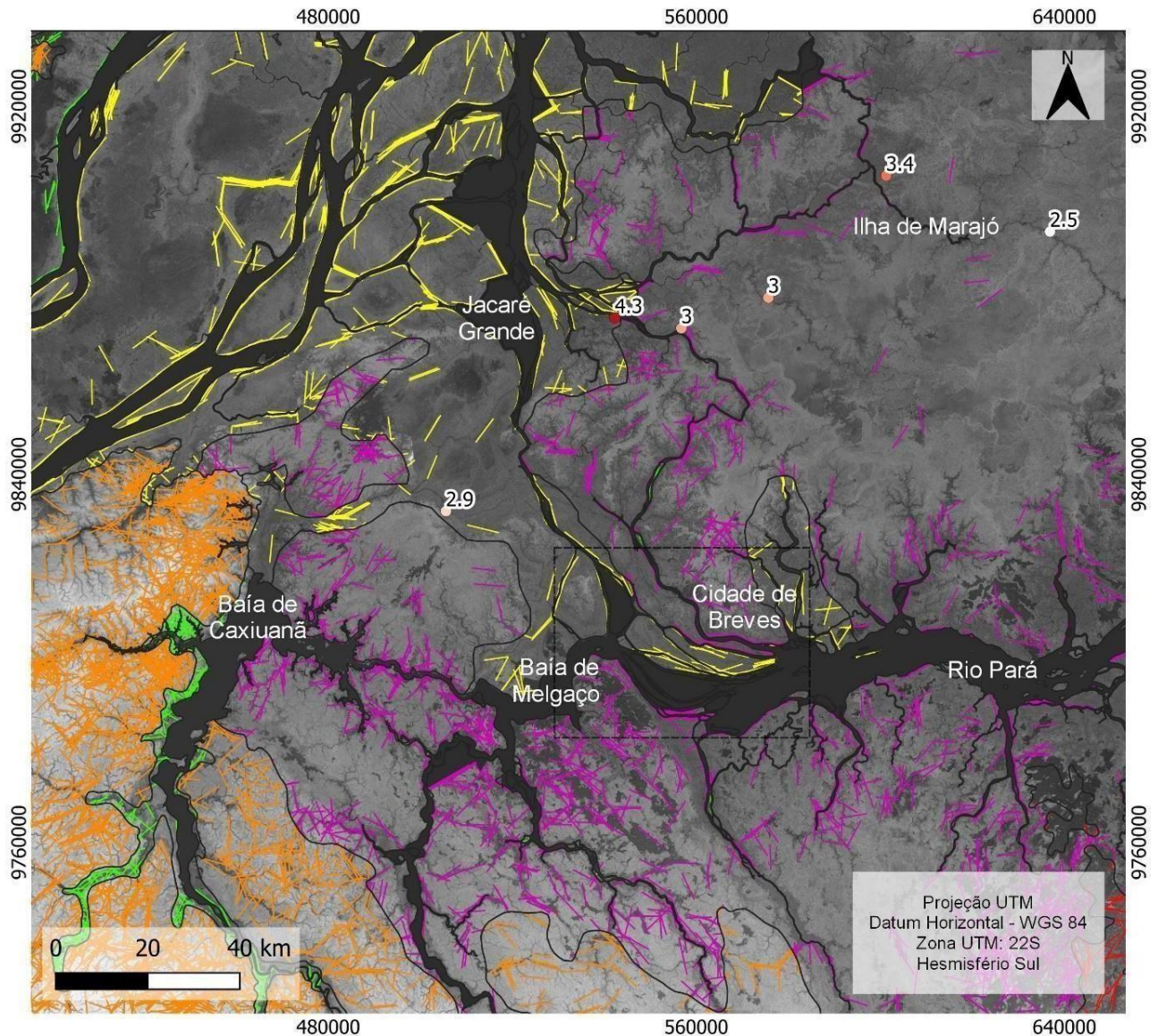


Figura 4. Possíveis modelos tectônicos regionais compatíveis com os dados dos domínios de lineamentos estruturais mapeados.

A variação das direções principais dos domínios de lineamentos nas diferentes litologias e idades (Figura 5) apresentaram as mesmas orientações, com exceção da Formação Alter do Chão e Formação Barreiras, que apresentaram orientação mais próxima de NE-SW e com desvio padrão de 20.3° e 15.51° respectivamente, mais elevado que nas demais unidades litoestratigráficas: Formação Pós-Barreiras: 14.19°; Formação Tucunaré: 12.41°; Depósitos Aluvionares: 15.91°. Dessa forma, pode-se inferir que toda a região estudada provavelmente está sob o mesmo regime de esforços e a deformação abrangeria materiais holocênicos, como é o caso da Formação Pós-Barreiras (TATUMI et al., 2008). Os dados da Rede Sismográfica Brasileira, disponibilizados pelo Centro de Sismologia do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, reforçam que há uma tectônica recente agindo sobre os materiais Quaternários da Formação Pós Barreiras, mostrando que os epicentros dos tremores se alinham na direção NE-SW, destacando-se pelo menos dois tremores de 4,5 e 4,3 mR ocorridos em 1977 (ASSUMPÇÃO et al., 1985), e 2022, respectivamente, na Ilha de Marajó.

Foram identificadas inúmeras anomalias de drenagem (Figura 6) na área. No baixo Amazonas e entre a baía de Caxiuanã e o rio Pará ocorrem segmentos de drenagem retilíneos. Nas mesmas áreas, também foram identificados cotovelos, destacando-se grandes cotovelos presentes nas baías de Caxiuanã e Melgaço, os quais conferem ao padrão de drenagem local um aspecto bastante geometrizado, com segmentos de canais ortogonais. Foram identificados também cotovelos duplos, porém mais dispersos na área. Confluências em 90° foram mapeadas entre o rio Jacaré Grande, Baía de Melgaço e seus respectivos tributários. Além disso, grande parte das bacias que compõe a área de estudo apresenta forte assimetria, destacando-se as da margem esquerda do rio Pará. Com relação aos paleocanais, estão concentrados em uma extensa área entre a baía de Caxiuanã e o rio Jacaré Grande. Tais resultados também estão presentes em Mantelli e Rosseti (2009), que indicaram ainda possíveis basculamentos nas proximidades da cidade de Breves, formados por reativações cenozóicas de falhas tectônicas, apontamento também realizado por Costa et al. (2001).



Lineamentos	Unidades Litoestratigráficas	Sismos	Ano
	Pós Barreiras (Quaternário - Holoceno)		2,5 2016
	Tucunaré (Quaternário - Holoceno)		2,9 2018
	Depositos Aluvionares (Quaternário - Holoceno)		3,0 2018
	Barreiras (Neógeno - Mioceno)		3,4 2014
	Alter do Chão (Paleógeno)		3,5 2020
	Região Deltaica		4,3 2021

Figura 5. Lineamentos estruturais mapeados nas diferentes litologias que compõe a área estudada.

De acordo com Bishop (1995), cotovelos (*elbow of capture*) marcam o ponto de decapturas fluviais, que são mecanismos de rearranjo de drenagem em que ocorre a transferência de parte ou de todo o fluxo de um rio para outro. Nesse sentido, vale destacar os grandes cotovelos encontrados nas baías de Caxiuanã e Melgaço (Figura 6), em que as baías seguem para NE e, no ponto de inflexão de 90° (cotovelo) mudam o curso para SE. Além dos cotovelos, observou-se também, entre a baía de Caxiuanã e o rio Jacaré Grande, uma área interpretada com um grande vale seco (*dry valleys*), que, de acordo com Small (1977), fazem parte da paisagem pós captura e se posicionam entre o cotovelo e as novas cabeceiras do rio rompido.

O exemplo mais importante deste contexto está situado a Norte da baía de Caxiuanã: nessa área foi identificado um longo paleovale fluvial que parece compor um antigo prolongamento da baía de Caxiuanã. O paleovale segue a orientação NE e se ramifica em vários paleocanais a ENE. A feição dos paleocanais e do paleovale como um todo se assemelha à forma de um delta, em que o vale aluvial seria representado pelo paleovale e os lobos deltaicos representados pelos paleocanais, completando uma paleo feição cuspidata, ou seja, um paleodelta. O paleodelta estaria posicionado não apenas na região dos vales secos mapeada, mas também no canal de maior dimensão que interligaria o rio Amazonas ao rio Pará, tal como apontado por Ab'Saber (2006), refletindo na possível existência de um paleodelta a noroeste da atual posição do delta Breves-Boiuçu.

A análise da mudança da linha de costa do delta (Figura 7) mostrou que, entre 1986 e 2019, o delta Breves/Boiuçu sofreu processos de agradação e erosão em diferentes regiões. No período analisado, a área do delta, que é de 574 km², teve um aumento de 5,71 km² e a taxa anual de crescimento foi de 0,17 km²/ano. As ilhas que apresentaram a maior taxa de crescimento estão localizadas na região sudeste do delta, em sua parte frontal, com o crescimento de área de 2,54 km², representando 45% do crescimento total. A progradação também ocorre nas laterais dos lóbulos deltaicos, nas barras disciplinares ao fluxo principal do rio, para leste, formadas possivelmente pela avulsão do canal principal com a origem de canais secundários. Estes entalham a planície de inundação, provocando variações intra- canal e acumulação de formas de leito que emergem, estabilizam-se e, posteriormente, podem ser vegetadas (LELI et al., 2021), podendo caracterizar *topset deposits*.

Houve perda total de 1,1 km² na região com maior taxa de erosão, localizada acima da zona do vale aluvial que fornece sedimentos ao delta, nas ilhas a Noroeste, marcando perda de área de 0,8 km².

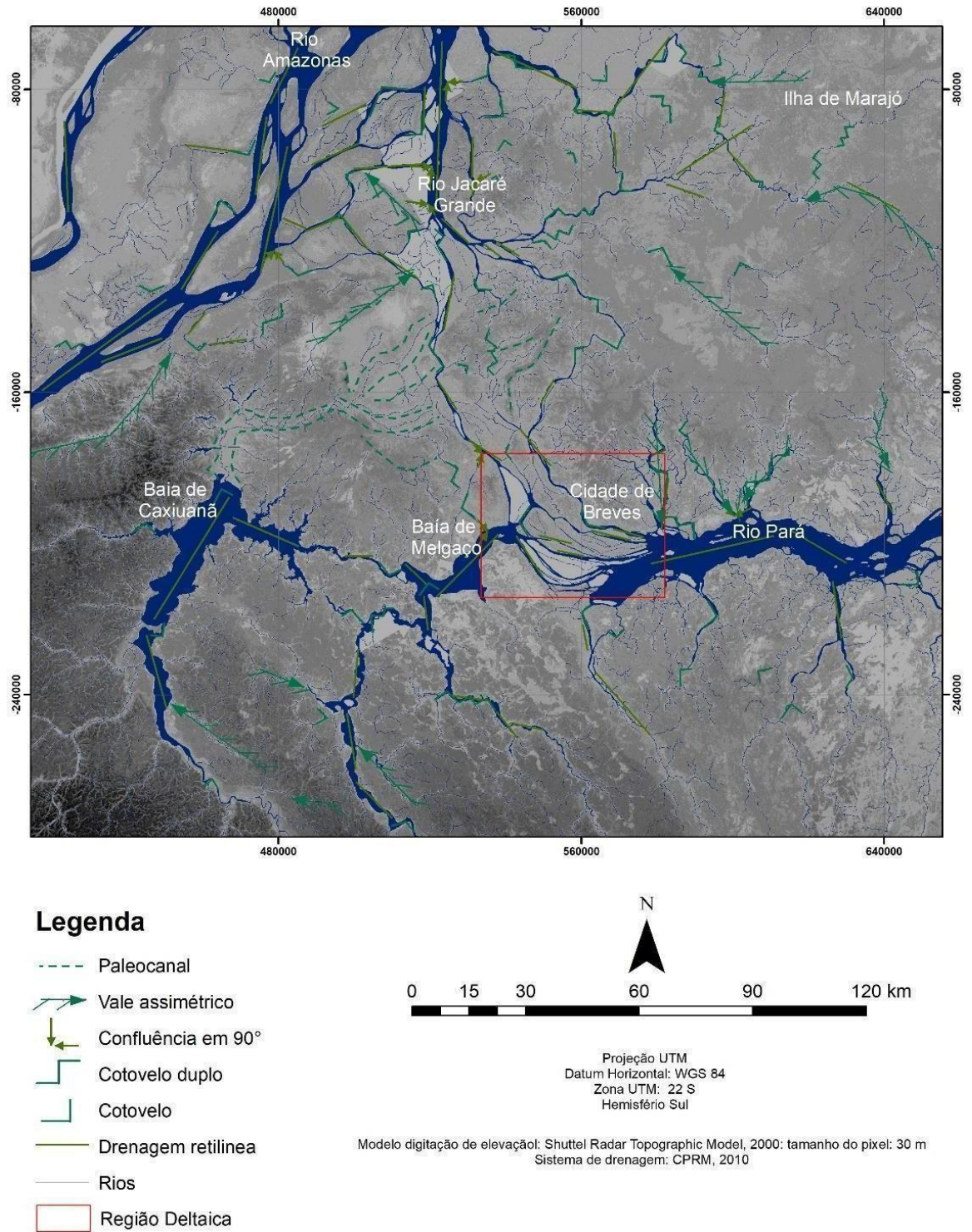


Figura 6. Anomalias de drenagem e paleocanais na área de estudo.

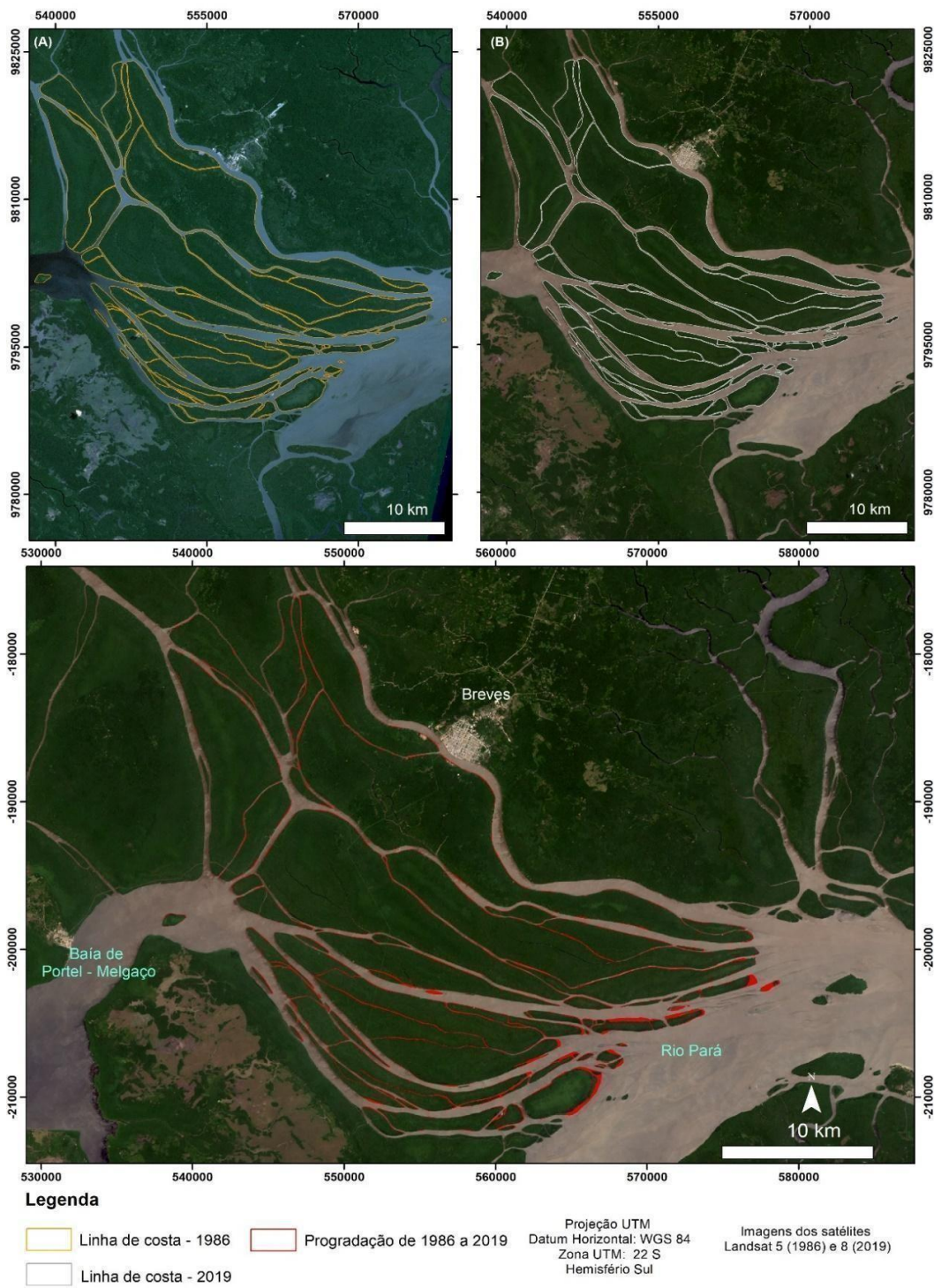


Figura 7. Índice de progradação do delta. (A) Linha de costa em 1986. (B) Linha de costa em 2019. (C) Progradação do delta de 1986 a 2019.

Diante de todos os dados apresentados, foi estabelecido um modelo genético- evolutivo (Figura 8) que expõe a formação de um paleodelta e a do atual delta Breves- Boiçu divididos nas etapas A, B, C e D.

Na etapa A, o paleodelta recebe os sedimentos da Baía de Caxiuanã e sua zona distributória deságua no rio Amazonas, ocorrendo também a presença de um canal de maior dimensão ao Norte da Baía de Melgaço. Na etapa B, ocorre a reativação do Arco de Gurupá e da zona de cisalhamento dextral E-W durante o Mioceno, redirecionando os fluxos que seguiam para NE-SW, na área do atual paleodelta, gerando as capturas das baías de Caxiuanã e Melgaço. Na etapa C, mostra-se o início do assoreamento dos canais na área do paleodelta devido às alterações do nível do mar, ocorridas durante o Quaternário, e a captura da Baía de Caxiuanã para a Baía de Melgaço. Finalmente, na etapa D, o paleodelta teria sido abandonado devido à captura entre as baías. Além disso, grande parte dos seus canais teria sido assoreada devido ao aumento do nível do mar. Nesse contexto, um novo delta surgiria ao Norte da Baía de Melgaço, o Delta Breves- Boiuçu.

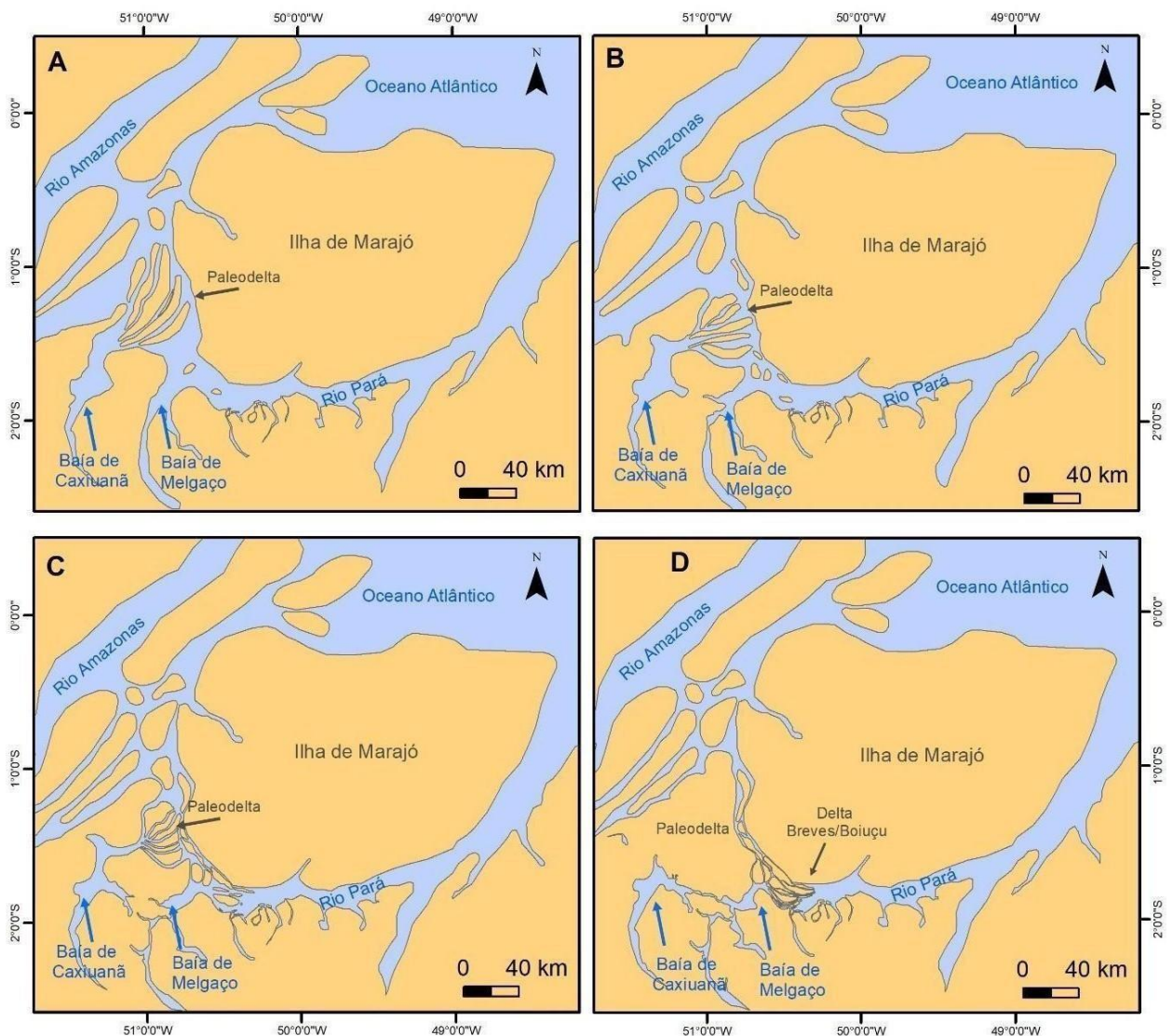


Figura 8. Modelo genético-evolutivo do Delta Breves-Boiuçu e do paleodelta.

Considerações Finais

É possível concluir que a hipótese levantada no início da pesquisa foi confirmada, isto é, o Delta Breves-Boiuçu estaria sendo formado pela contribuição do aporte sedimentar das baías de Caxiuanã e Melgaço, cujas causas estariam relacionadas às formações dos paleocanais e estruturas tectônicas reativadas desde o Mioceno. Os resultados ajudam a inferir que a distensão causada pela reativação do Arco de Gurupá e da zona de cisalhamento transcorrente dextral E-W, dentro do regime tectônico vigente, resultaria na formação/reativação de falhas normais NW-SE. Os cotovelos fluviais correspondentes às baías de Caxiuanã e Melgaço sugerem que essas baías teriam passado por processo de captura fluvial, induzida pela zona de cisalhamento dextral (E-W) inferida, mudando o curso das baías para SE. Com isso, o paleodelta que seria um prolongamento da Baía de Caxiuanã teria sido abandonado e um novo delta seria formado a leste da Baía de Melgaço, após o reajuste da drenagem. Dessa forma, a atividade neotectônica teria tido influência na gênese do novo delta, o delta Breves-Boiuçu, sendo possivelmente mais antigo do que foi sugerido no trabalho de Ab'Saber (2006). Portanto, a formação do delta, ao Norte da Baía de Portel-Melgaço, se deu após o reajuste da drenagem e do abandono do paleodelta ao Norte da Baía de Caxiuanã, numa dinâmica neogênica e quaternária complexa no que tange tanto ao aporte sedimentar fluvial e transgressivo, como às oscilações do nível das marés, especialmente no Holoceno.

Agradecimentos

Agradecemos à Prof. Dra. Paola Cianfarra e ao Prof. Dr. Fabiano do Nascimento Pupim, pelas contribuições dadas durante o exame de qualificação de mestrado, e ao Grupo Nostradamos do Laboratório de Pedologia (DG – FFLCH – USP), pelas inúmeras sugestões recebidas durante as nossas reuniões. Agradeço também ao PPGF, pela oportunidade dada, e à CAPES pela bolsa concedida (Processo 88887.464450/2019-00).

Referências

- AB'SABER, A. N. Brasil: paisagens de exceção: O Litoral e Pantanal Matogrossense. São Paulo: Ateliê Editorial, 2006.
- ASSUMPÇÃO, M., DIAS, F. L., ZEVALLOS, I.; NALIBOFF, J. B. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*, 71, 278–295, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.005>

- ASSUMPÇÃO, M., SUAREZ, G.; VELOSO, J. A. Fault Plane Solutions of intraplate Earthquakes in Brazil: some constraints on the regional stress field. *Tectonophysics*, 113, 283–293, 1985.
- AZEVEDO, R. P. Tectonic evolution of Brazilian Equatorial Continental Margin Basins. University of London, 1991.
- BESSET, M., ANTHONY, E. J.; BOUCHETTE, F. “Multi-decadal variations in delta shorelines and their relationship to river sediment supply: An assessment and review”, *Earth-Science Reviews*. Elsevier, 193(April), p. 199–219, 2019. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.04.018.
- BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. *Progress in Physical Geography*, 19, p. 449–473, 1995.
- CAPUTO, M. V.; SOARES, E. A. A. Eustatic and tectonic change effects in the reversion of the transcontinental Amazon River drainage system. *Brazilian Journal of Geology*, 46(2), p. 301–328, 2016. doi: 10.1590/2317-4889201620160066.
- CASTRO, D. F., ROSSETTI, D. DE F. E RUIZ PESSENDA, L. C. Facies, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ and C/N analyses in a late Quaternary compound estuarine fill, northern Brazil and relation to sea level. *Marine Geology*, 274(1–4), p. 135–150, 2010. doi: 10.1016/j.margeo.2010.03.011
- CIANFARRA, P., PINHEIRO, M. R., VILLELA, F. N. J.; SALVINI, F. Intraplate Strike-Slip Corridor within South America (NE Border of the Paraná Basin) Unveiled by Structural Analysis of Faults and Fracture Swarms. *Geosciences*, 12(2), 101, 2022. <https://doi.org/10.3390/geosciences12020101>
- CIANFARRA, P. E SALVINI, F. Lineament Domain of Regional Strike-Slip Corridor: Insight from the Neogene Transtensional De Geer Transform Fault in NW Spitsbergen. *Pure and Applied Geophysics*, 172(5), p. 1185–1201, 2015. doi: 10.1007/s00024-014-0869-9.
- COSTA, JOÃO B. S.; BEMERGUY, RUTH L.; HASUI, Y. E BORGES, M. DA S. Tectonics and paleogeography along the Amazon river. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(4), p. 335–347, 2001. doi: 10.1016/S0895-9811(01)00025-6.
- CPRM. GeoSGB sistema de geociências: dados, informações e produtos do Serviço Geológico do Brasil. Arquivos vetoriais: Mapas estaduais de Geodiversidade. Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/>. Acessado em: 28 de maio de 2018.
- DAMUTH, J. E.; FLOOD, R. D. Morphology, sedimentation processes, and growth pattern of the Amazon Deep-Sea Fan. *Geo-Marine Letters*, 3(2–4), p. 109–117, 1984. doi: 10.1007/BF02462455.
- DRISCOLL, NEAL W.; KERNER, G. D. Flexural deformation due to Amazon Fan loading: a feedback mechanism affecting sediment delivery to margins. *Geology*, p. 1015–1018, 1994.
- HASUI, Y. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In: SBG/Núcleo Minas Gerais, I Workshop Sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental No SE Do

- Brasil, 11, 1–31, 1990.
- HOWARD, A. D. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *The Amer. Assoc. of Petr. Geol.*, 51(11), 2246–2256, 1967.
- LELI, I. T., HAYAKAWA, E. H., SANTOS, V. C. DOS,; STEVAUX, J. C. Island and anabranching generation processes – a comparative review in the Upper Paraná River. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 22(1), 2021. <https://doi.org/10.20502/rbg.v22i1.1830>
- MANTELLI, L. R.; ROSSETTI, D. F. Significado tectônico de lineamentos de drenagem no sudoeste da ilha do Marajó”, *Revista Brasileira de Geociências*, 39(1), p. 42– 54, 2009. doi: 10.25249/0375-7536.20093914254.
- PANIZZA, M.,; CASTALDINI, D. Neotectonic research in applied geomorphologic studies. *Zeitschrift Fur Geomorphologie, Vupple.-Bd. 63*, 173–211, 1987.
- PINHEIRO, M. R. Estudo morfotectônico da região da Serra de São Pedro e do Baixo Piracicaba/SP. 292 f. 2014. Tese (Doutorado em Ciências), DG/FFLCH/USP, São Paulo/SP, 2014.
- PINHEIRO, M. R. et al. Tectonics of the Northeastern border of the Parana Basin (Southeastern Brazil) revealed by lineament domain analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, 94(June). 2019. doi: 10.1016/j.jsames.2019.102231.
- ROSSETTI, D. F. et al. Neotectonics in the northern equatorial Brazilian margin. *Journal of South American Earth Sciences*. Elsevier Ltd, 37, p. 175–190, 2012. doi: 10.1016/j.jsames.2012.03.004
- SALVINI, F., BILLI, A.; WISE, D. U. Strike-slip fault-propagation cleavage in carbonate rocks: The Mattinata Fault zone, southern Apennines, Italy. *Journal of Structural Geology*, 21(12), p. 1731–1749, 1999. doi: 10.1016/S0191-8141(99)00120-0.
- SMALL, R. J. *The Study of Landforms: A Textbook of Geomorphology*. Cambridge, University Press, 1977.
- SUGUIO, K., MARTIN, L., BITTENCOURT, A. C. S. P., DOMINGUEZ, J. M. L., FLEXOR, J.-M., AZEVEDO, A. E. G. Flutuações do nível relativo do mar durante o quaternário superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. *Revista Brasileira de Geociências*, 15(4), 273–286, 1985. <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/12026/11570>
- SUGUIO, K. *A Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais: (passado + presente = futuro)*. São Paulo: Paulo’s Comunicação e Artes Gráficas, 1999.
- SUMMERFIELD, M. *Global Geomorphology*. 2o ed. Estados Unidos: Person.
- TATUMI, S. H. et al. Datação de Sedimentos Pós-Barreiras no Norte do Brasil: implicações paleogeográficas. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(3), p. 514–524, 2008. doi: 10.25249/0375-7536.2008383514524.

VILLEGAS, J. M. C. Geologia estrutural da bacia de Marajó. Universidade Federal do Pará, 1994.

WISE, D. U. et al. Geological Society of America Bulletin Topographic lineament swarms : Clues to their origin from domain analysis of. Geological Society Of America Bulletin, 1985. doi: 10.1130/0016-7606(1985)96<952.

Linha de Pesquisa: Estudos interdisciplinares em Pedologia e Geomorfologia

**MAPA MORFOLÓGICO DE ÁREA AMOSTRAL - PENÍNSULA FILDES,
ILHA REI GEORGE, PENÍNSULA ANTÁRTICA**

Pamela Cristina Cazaroto¹, Fernando Nadal Junqueira Villela¹,

Márcio Rocha Francelino², Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer²

¹Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia

²Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos

pamela.cazaroto@usp.br

Resumo

O objetivo do presente estudo é apresentar o mapeamento morfológico em escala de detalhe de área amostral na Península Fildes (PF), Ilha Rei George (IRG) - Antártica Marítima. A IRG, localizada a oeste da Península Antártica, arquipélago das Shetlands do Sul, tem em sua área sudoeste a PF, que apresenta 29 km² de área livre de gelo. A área amostral, de, aproximadamente, 90.000 m², fica na parte oeste da PF, ao sul da pista de pouso do aeroporto da base chilena. A área compõe parte da bacia hidrográfica do Rio Grande, apresentando orientação leste-oeste com jusante para o Estreito de Drake e vale em U decorrente da descarga de gelo depois do Último Máximo Glacial. Em torno de 58% de sua área está circunscrita em um primeiro nível de terraço marinho soerguido. O substrato é composto, predominantemente, por basalto porfirítico e derrames de andesito basálticos interditados por rochas vulcanoclásticas, além de sedimentos quaternários. Os solos que compreendem a área são classificados como gleissolos e haplic arenosol (WRB). Sobrevoada por drone em fevereiro de 2022, durante a 40ª Operação Antártica (OPERANTAR XL), obteve-se arquivo no formato raster de alta resolução que, com auxílio de fotografias do local e referências bibliográficas, viabilizou o mapeamento morfológico com escala de apresentação em 1:1.500. A vetorização foi feita em 1:100 segundo a identificação de elementos tais como: (I) morfologia de vertente (mudanças e rupturas, côncavas e convexas); (II) afloramentos e depósitos glaciais (till); (III) feições e depósitos periglaciais e nivais, como: escoamento nival, lóbulos de gelifluxão, solos com padrão poligonal, nichos de nivação, depósitos de tálus, vertente com solifluxão e bancos e acúmulos de neve; (IV) hidrografia com delimitação da planície fluvial e sistema de drenagem entrelaçado; (V) setor de movimentação de massa e; (VI) áreas com presença de vegetação (musgos e líquens) e com aparente processo de piritização e oxidação. No caso das áreas com banco e acúmulo de neve, vegetação e piritização/oxidação foram utilizadas separadamente as bandas RGB da imagem coletada com o sobrevoo de drone e, através de amostras dentro da área mapeada, foram obtidos valores espectrais dentro de cada banda ao qual poderiam corresponder essas classes. Assim, com a execução de uma função condicional elaborada para cada um desses elementos a serem mapeados, gerou-se a delimitação desses componentes e, posteriormente, as correções necessárias. A morfologia de vertente foi auxiliada pelos dados de elevação do REMA (Reference Elevation Model of Antarctica) com 2 metros de resolução. A partir do mapa foi possível inferir a distribuição diferencial entre os processos no setor de vertente e planície, culminando em áreas de solo com padrão poligonal nesse último, além de maior superfície vegetada e com oxidação e piritização por conta da distribuição hídrica.

Palavras-chave: *Península Fildes; Antártica; Mapa Morfológico.*

Research Line: Interdisciplinary studies in Pedology and Geomorphology

**MORPHOLOGICAL MAP OF A SAMPLED AREA - FILDES PENINSULA,
KING GEORGE ISLAND, ANTARCTIC PENINSULA**

Pamela Cristina Cazaroto¹, Fernando Nadal Junqueira Villela¹,

Márcio Rocha Francelino², Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer²

¹University of Sao Paulo, Department of Geography

²Federal University of Viçosa, Department of Soils

pamela.cazaroto@usp.br

Abstract

The aim of the present study is to present detailed morphological mapping on a fine scale of the sampled area in Fildes Peninsula (FP), King George Island (KGI) - Maritime Antarctica. KGI, located west of the Antarctic Peninsula in the South Shetland Islands archipelago, encompasses PF in its southwest area, which has 29 km² of ice-free area. The sampled area, approximately 90,000 m² in size, is situated in the western part of PF, south of the Chilean base airport runway. This area is part of the Rio Grande watershed, with an east-west orientation downstream towards the Drake Passage and a U-shaped valley resulting from ice discharge after the Last Glacial Maximum. Approximately 58% of its area is circumscribed by a first level of uplifted marine terrace, with the substrate predominantly composed of porphyritic basalt and interdicted basaltic andesite flows by volcanoclastic rocks, along with Quaternary sediments. Soils in the area are primarily classified as gleysols and haplic arenosols (WRB). A high-resolution raster file was obtained from a drone flyover in February 2022, during the 40th Antarctic Operation (OPERANTAR XL). With the assistance of photographs of the location and bibliographic references, this enabled morphological mapping with a presentation scale of 1:1,500. Vectorization was carried out at 1:100 based on the identification of elements such as: (I) slope morphology (changes and ruptures, concave and convex); (II) glacial outcrops and deposits (till); (III) periglacial and nival features and deposits, including snowmelt, gelifluction lobes, soils with patterned ground, nivation niches, talus deposits, solifluction slope, and snow banks and accumulations; (IV) hydrography with delineation of the river plain and interconnected drainage system; (V) mass movement sector; and (VI) areas with vegetation presence (mosses and lichens) and apparent pyritization and oxidation processes. For areas with snow banks and accumulations, vegetation and pyritization/oxidation processes, the RGB bands of the image collected during the drone flyover were separately utilized, and spectral values were obtained for each class within the mapped area through samples. Subsequently, a conditional function was executed for each of these elements to be mapped, resulting in the delineation of these components and subsequent necessary corrections. Slope morphology was assisted by elevation data from the REMA (Reference Elevation Model of Antarctica) with a resolution of 2 meters. From the map, it was possible to infer the differential distribution of processes in the slope and plain sectors, culminating in areas with polygonal soil patterns in the last one, as well as a greater vegetated surface and oxidation and pyritization due to water distribution.

Key-words: *Fildes Peninsula; Antarctica; Morphological Map.*

Introdução

A Península Fildes (PF), localizada ao sul da Ilha Rei George, no Arquipélago das Ilhas Shetland do Sul, Antártica Marítima, apresenta dois platôs, um ao sul e outro ao norte, separados por uma depressão central e uma elevação conhecida como Fossil Hill, de orientação leste-oeste (SCHMID et al., 2017). A Geleira Collins, massa de gelo ao norte da PF, sofreu retração quaternária que incorreu na formação de glaciares isolados na península, cada um recobrando um platô (PETSCH et al., 2018).

É possível observar na península a diferença de patamares elevado e médio, além dos cordões praias soerguidos e diques com cristas mapeadas. Percebe-se também a correspondência dos corpos hídricos com a estrutura geológica local, amplamente composta por basaltos, andesitos e rochas vulcanoclásticas.

Os processos geomorfológicos predominantes na PF são a nivação, solifluxão, ablação e crioturbação (SIMAS et al., 2008). Para sistemas periglaciais fluviais, o transporte de sedimentos se dá, principalmente, por água no estado líquido provinda do derretimento da neve ou de precipitação (PETSCH, 2018). Todavia, locais com menor aporte hídrico podem ter a prevalência do transporte por meio de gelifluxão e queda de blocos, por exemplo (CLARK, 1988; PETSCH, 2018).

Simonov (1975), averiguando características topográficas na PF, observou que os bancos de neve não estão associados a nenhuma altitude específica, e que os bancos de maiores proporções foram observados em vertentes voltadas para sudeste, podendo haver circos de nivação com 50-70 m de diâmetro. Atentando aos processos na superfície, o mesmo autor expõe que, dependendo da intensidade do processo de solifluxão, é possível que se gere fluxo linear com transporte de solo ou, ainda, que sejam formados canais de fluxo de solo. Nesses casos, a solifluxão estaria associada a bancos de neve (SIMONOV, 1975).

A PF possui muitas bases antárticas de diversas nacionalidades. A principal é a Base Chilena Eduardo Frei, que conta com o Aeroporto Rodolfo Marsh, principal porta de entrada para esta parte da Antártica Marítima. Ao sul do aeroporto, voltada para o Estreito de Drake a oeste, existem interflúvio e planície que configuram modelado de relevo intensamente trabalhado por processos de superfície, constituindo interessante área amostral que remonta a condições esculturais periglaciais, paraglaciais e proglaciais.

A área amostral está circunscrita na bacia do rio Grande com jusante para o estreito de Drake, onde seu vale em “U” foi formado por uma geleira que drenava de Leste-Oeste neste vale após o Último Máximo Glacial (PETSCH et al., 2018). Assim, este trabalho pretende indicar, a partir de cartografia morfológica, os processos de superfície que esculpem esta área amostral, contribuindo ao conhecimento de processos desta parte insular do continente antártico.

Material e Métodos

A partir de materiais cartográficos e referenciais teóricos foi elaborado mapa morfológico da área amostral citada, localizada na porção oeste da PF ao sul da pista de pouso da base chilena com área de, aproximadamente, 90.000 m² (Figura 1).

O mapeamento da área amostral foi elaborado por meio de fotointerpretação a partir de imagem de Drone (TERRANTAR, 2022) e referenciais teóricos e visuais para a classificação das feições. A morfologia de vertente foi delimitada por meio do ArcScene 10.8 utilizando a imagem de drone sobreposta ao MDE (REMA, 2022 – 2 metros de resolução), segundo perfis longitudinais e visualização em 3D da área. A vetorização de todos os componentes se deu em 1:100 e a simbologia utilizada foi retirada de Joly (1997). Feições de piritização e oxidação, cobertura de musgos e líquens e bancos e áreas de acúmulo de neve foram processados a partir de fatores condicionais descritos a seguir.

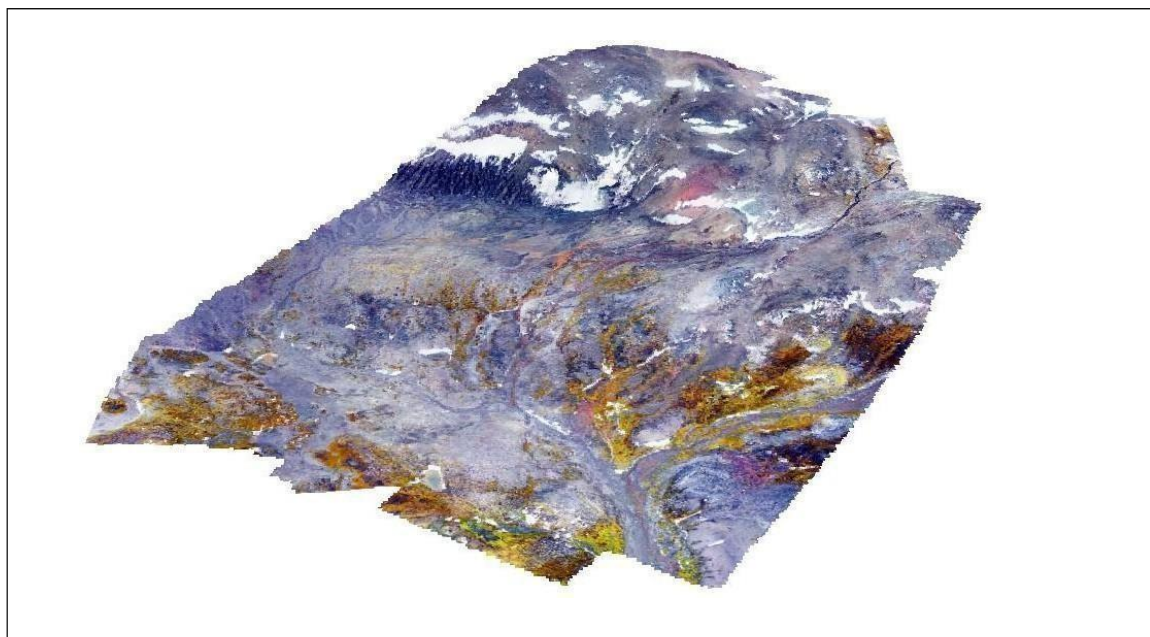


Figura 1. Imagem de Drone da Área Amostral sobreposta ao MDE da área.

No ArcMap 10.8 foram utilizados cerca de 50 pontos amostrais para cada classe de feição com o intuito de verificar o comportamento espectral em cada uma das bandas (R, G e B) do raster gerado a partir das imagens de Drone. Assim, foram criadas equações condicionantes que, após processamento, passaram por ajustes excluindo-se polígonos irrelevantes para a escala de apresentação do mapa, além de áreas delimitadas incorretamente. Um exemplo de condicionante gerada para a identificação de feições de

oxidação e piritização da área amostral pode ser visto a seguir:

$$(Con((Red) \geq 235,1))and(Con((Green) \geq 185,1))and(Con((Green) \leq 230,1))and(Con((Blue) \geq 156,1))and(Con((Blue) \leq 212,1))$$

Resultados e Discussões

A área amostral é um recorte da bacia hidrográfica do Rio Grande, que tem formação de paleovale em “U” escavado pela descarga da geleira. Nessa área foram coletadas amostras para datação e amostras de solo e sedimento, com sobrevoo de drone em uma área de aproximadamente 90.000 m². A área apresenta uma amplitude altimétrica de aproximadamente 36 metros, passando de setor de vertente para planície.

No processo de análise da imagem e vetorização das feições foram identificados elementos tais como: (I) morfologia de vertente (mudanças e rupturas, côncavas e convexas); (II) afloramentos e depósitos glaciais (till); (III) feições e depósitos periglaciais e nivais, como: escoamento nival, lóbulos de gelifluxão, solos com padrão poligonal, nichos de nivação, depósitos de tálus, vertente com solifluxão e bancos e acúmulo de neve; (IV) hidrografia com delimitação da planície fluvial e sistema de drenagem entrelaçado; (V) setor de movimentação de massa e; (VI) áreas com presença de vegetação (musgos e líquens) e com aparente processo de piritização e oxidação. Tais feições são correlacionadas, sobretudo, ao aporte hídrico. Em detalhes, pode ser observado o seguinte:

I. *Morfologia de vertente (mudanças e rupturas, côncavas e convexas)*: as vertentes passam de características convexas para côncavas em direção à transição da vertente para planície, tendo mudança convexa próxima ao banco de neve principal. A vertente é voltada para oeste e sudoeste, sendo essa uma das áreas da península com maior desenvolvimento da vegetação e de processos relacionados ao aporte de água, em razão da umidade proveniente do Estreito de Drake;

II. *Afloramentos e depósitos glaciais (till)*: os afloramentos referem-se à litologia da área e os depósitos glaciais são indiferenciados. Os afloramentos concentram-se nos setores de vertente, incluindo áreas correspondentes possivelmente a antigos bancos de neve e com a movimentação de massa estimulada pela nivação, cujo aporte de água/gelo em subsuperfície criou uma lâmina de lubrificação que possibilitou a retirada do material sobreposto, deixando o afloramento exposto;

III. *Feições e depósitos periglaciais e nivais* (Figura 2), tais como escoamento nival, lóbulos de

gelifluxão, solos com padrão poligonal, nichos de nivação, depósitos de tálus, vertente com solifluxão e bancos e acúmulo de neve:

a. As **áreas de gelifluxão** são distintas da solifluxão pela presença de gelo em subsuperfície que promove um movimento lento e mais linear, no caso mapeado, onde aparentemente há uma resistência apreciável que promove desaceleração do centro, deixando a parte externa mais móvel (FRENCH, 2018);

b. Os **depósitos de tálus** ficam em setores diferentes da vertente e parecem estar correlacionados a acúmulos de sedimentos vinculados à hidrologia de bancos de neve. Esses depósitos estão à jusante da feição de solos com padrão que, de acordo com Lopes et al. (2023), configura-se como uma associação frequente;

c. O **nicho de nivação** está diretamente vinculado ao banco de neve que não é mais contínuo, porém, se forem considerados em termos de processos vinculados, os bancos de neve estão associados entre si e formam um único nicho de nivação que, concomitante ao derretimento da neve e à erosão da vertente, formou uma área de cornija e ruptura côncava previamente escavada pela neve acumulada. O nicho de nivação então está ligado à existência do banco de neve, ao recuo da vertente, à morfologia côncava e ao derretimento da neve, pois é necessário que haja aporte hídrico para o desenvolvimento dessa feição;

d. No setor de vertente abaixo da área de nicho de nivação formam-se **lóbulos de solifluxão**. De acordo com French (2018), áreas de solifluxão em setores de vertente e em áreas como antártica e ártico, formam linhas de escoamento nival com remoção de material superficial e, às vezes, podem chegar ao substrato expondo o afloramento. Nesse caso, as linhas são bem visíveis pelo escoamento nival, com lóbulos de solifluxão bem desenvolvidos. Para Barsch (1993), a solifluxão é o processo responsável pela evolução da diminuição do ângulo da vertente e formas que prevalecem em ambientes periglaciais inativos;

e. Os **solos com padrão** (poligonal), assim como as outras feições identificadas, precisam de aporte hídrico em subsuperfície para sua formação. Ainda não há uma

explicação aceita de forma geral sobre o porquê da formação desses padrões geometrizados, mas sabe-se que sua formação está relacionada à expansão da área por congelamento em subsuperfície e a diminuição do volume durante o degelo, com expansão da massa de solo cujos sedimentos maiores são transportados para as laterais e o centro do polígono apresentando granulometria menor. Esta característica é típica da feição e pode ser observada tanto em superfície como em subsuperfície, tal como identificado por French (2018) e Machado (2020).

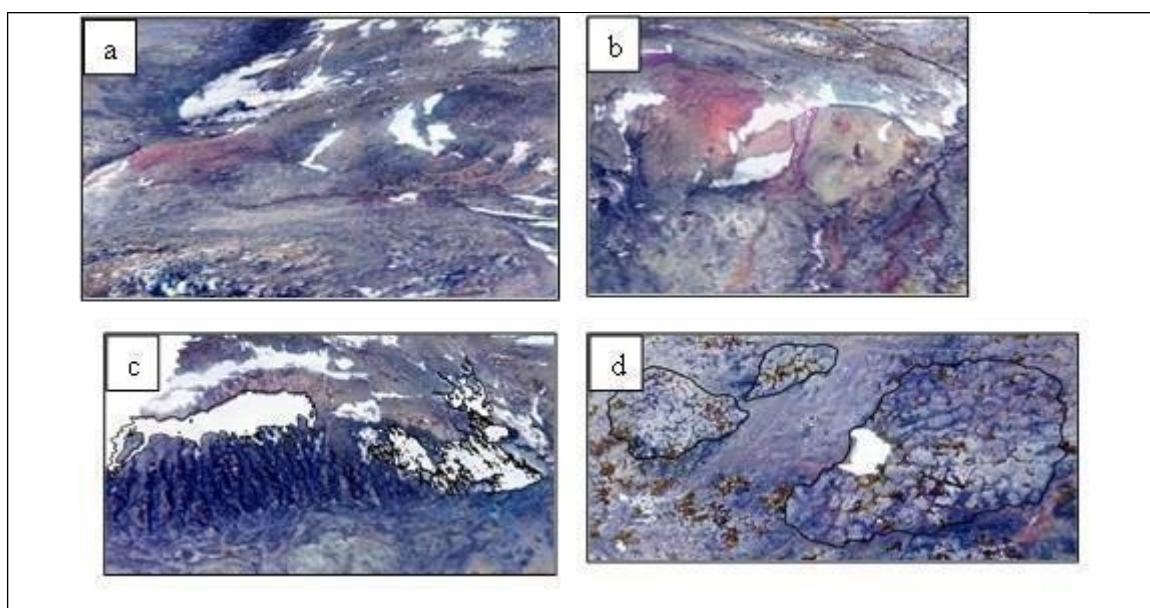


Figura 2. Feições periglaciais e nivais. a) Gelifluxão; b) Depósitos de tálus; c) Nicho de nivação e lóbulos de solifluxão; d) Solos com padrão.

IV. *Hidrografia*: com delimitação da planície fluvial e sistema de drenagem entrelaçado, formados pelo escoamento nival dos bancos de neve, com acúmulo de sedimentos e formação de terraços;

V. *Movimentação de massa*: identificada por mudanças na morfologia e área polida na lateral das vertentes, com linhas paralelas que apresentam orientação do movimento;

VI. *Vegetação*: representada por áreas com presença de musgos e líquens e com aparente processo de piritização e oxidação;

VII. *Piritização e Oxidação*: Filho (2005) destaca que esses processos ocorrem devido à alta acidez da água disponível, representando um dos principais fatores para o intemperismo químico na Ilha Rei

George. Na área amostral podem ser identificados processos de piritização e oxidação a partir da coloração amarelada e avermelhada respectivamente, compondo traçado em sua maioria acompanhando canais fluviais.

A partir da identificação de tais feições, foi possível elaborar o mapa morfológico da área amostral (Figura 3).

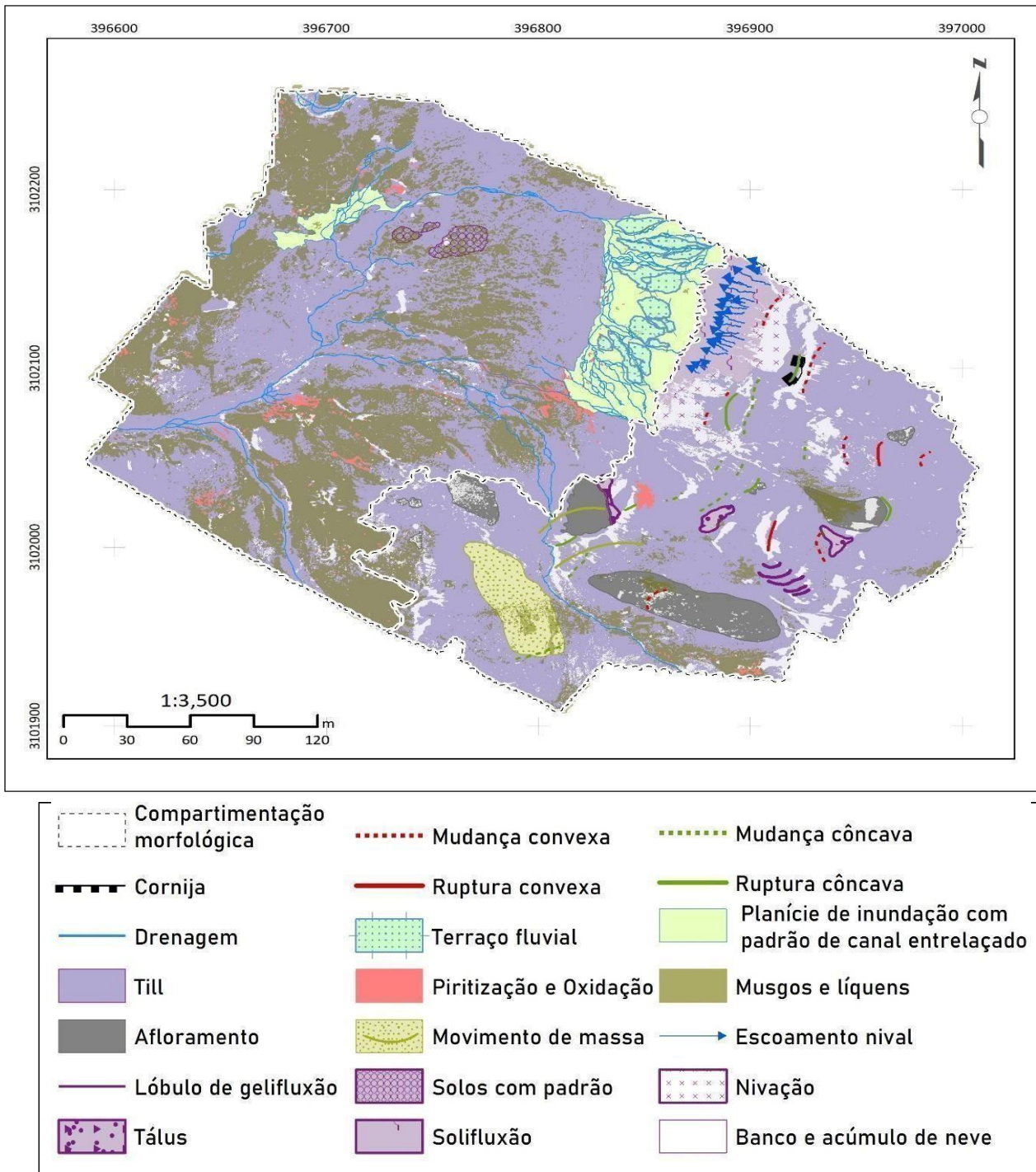


Figura 3. Mapa e legenda morfológica da área amostral.

Considerações Finais

Próximo à pista de pouso chilena, nos arredores da área amostral, datações de outros estudos realizados em área de patamar médio próxima à área amostral sugerem que esta se encontra livre de gelo há aproximadamente 7 mil anos. No entanto, a questão do vale em que se insere a área amostral permanece em aberto, sendo plausível entender que o recuo da geleira teria formado planície de outwash em que os corpos hídricos teriam sido alimentados inicialmente pelos fragmentos da geleira e, posteriormente, pelos bancos de neve. É possível verificar que, mesmo que a área que compõe essas características esteja vinculada à vertente com escoamento nival e solifluxão, a área ao sul, dentro da área amostral, também apresenta características de leque aluvial que, aparentemente, não está mais ativo já que a área ao sul apresenta maior quantidade de vegetação ocupando antigos corpos hídricos. Além disso, em área próxima ao norte da área amostral há possíveis feições correlacionadas ao degelo, tais como eskers.

A metodologia escolhida para a cartografia morfológica da área amostral possibilitou deduzir esses processos com apontamentos mais acurados, em especial quando considerados os fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais. Por exemplo, há a possibilidade de que a formação de solos com padrão esteja relacionada com a água intersticial. No caso, nota-se seu desenvolvimento em área de planície com possível aporte de água em subsuperfície proveniente dos bancos de neve a sudeste da área, no setor superior da vertente onde esses bancos de neve são responsáveis inclusive pela formação de vertente com solifluxão acentuada, escoamento nival e ravinamento. Portanto, a utilização de sobrevoo por Drone, o mapeamento de formas e feições e a leitura espacial deste modelado de relevo remonta à melhor compreensão da distribuição diferencial entre os processos no setor de vertente e planície, assim como suas associações, a exemplo da inferência de que nivação e solos com padrão estão inter-relacionados e correspondem diretamente às características da circulação hídrica.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas concedidas, ao Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), à Universidade Federal de Viçosa (UFV), à Universidade de São Paulo (USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (PPGF).

Referências

- BARSCH, Dietrich. Periglacial geomorphology in the 21 st century. [S. l.], v. 7, p. 141–163, 1993.
- CLARK, M.J. (Ed.), *Advances in Periglacial Geomorphology*. Wiley, Chichester, p. 3-31, 1988.
- FILHO, M. R. A. Geoquímica de solos da Península Keller, Ilha Rei George, Antártica, como subsídio ao monitoramento ambiental. Doutorado (tese do Programa de Pós- Graduação em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, 2005, 129p. FRENCH, Hugh M. *The Periglacial Environment*. Fourth ed. [s.l.] : John Wiley & Sons Ltd., 2018.
- JOLY, F. *Glossaire de géomorphologie - base de données sémiologiques pour la cartographie*. Masson/Armand Colin, Paris, 1997. 339 p.
- MACHADO, Mariana de R. Indicadores pedogeomorfológicos do estabelecimento de condição periglacial na Península Keller - Antártica Marítima. 2020. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2020.
- PETSCH, C.; ROSA, K. K. da; ROSEMARY, V; SIMÕES, J. C. Retrabalhamento de sedimentos das bacias glaciais da Península Fildes, Antártica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 11, n.07, p. 2335-2350. 2018.
- PETSCH, C. Evolução hidro-geomorfológica da zona proglacial da geleira Collins, Ilha Rei George, Antártica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS. 2018. 121 p.
- SCHMID, T. et al. Geomorphological mapping of ice-free areas using polarimetric RADARSAT-2 data on Fildes Peninsula and Ardley Island, Antarctica. *Geomorphology*, [S. l.], v. 293, p. 448–459, 2017. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.09.031. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.031>.
- SIMAS, Felipe N. B.; SCHAEFER, Carlos Ernesto G. R.; FILHO, Manoel R. Albuquerque.; FRANCELINO, Marcio Rocha; FILHO, Elpídio I. Fernande.; DA COSTA, Liovando M. Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, maritime Antarctica. *Geoderma*, [S. l.], v. 144, n. 1–2, p. 116–122, 2008. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.10.019.
- SIMONOV, I. M. Physical-geographic description of the Fildes Peninsula (South Shetland Islands). *Antarktika*, n° 14, p. 128-145. 1975.

Linha de Pesquisa: Paisagem e planejamento ambiental

MAPEAMENTO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA RESTAURAÇÃO FLORESTAL NAS BACIAS PCJ (PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ)

Marco Antonio Martins¹, Sueli Angelo Furlan¹

¹Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia

marco.antonio.martins@usp.br

Resumo

Neste trabalho, foi calculado o potencial em área (ha) de restauração a partir de Reservas Legais e Áreas de Preservação Permanente (APP) de 19.946 imóveis rurais localizados nos municípios de abrangência das Bacias PCJ (Piracicaba, Capivari e Jundiaí), incluindo a totalidade do Sistema Cantareira. As análises incluíram a contribuição dessas propriedades para o clima e para biodiversidade, a partir do cálculo de potencial de armazenamento de CO₂ e mapeamento de espécies de fauna e flora. Para isso, o método Análise Hierárquica de Processos (AHP) foi utilizado e foram aplicadas modelagens de geoprocessamento para que o mapeamento levasse em consideração variáveis do Código Florestal Brasileiro (Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012.), assim como métricas de conectividade florestal e de uso e cobertura da terra com dados do MapBiomass. Os resultados consistem em um banco de propriedades indicando o seu potencial (ha) para restauração e armazenamento de CO₂, além do mapeamento dos fragmentos florestais de acordo com a sua conectividade na paisagem. A análise indicou um potencial de armazenamento de toneladas de CO₂ por hectare de 35.977.903 (Tco₂eq/ha) e um potencial de restauração florestal de 55.202 ha, distribuídos em 1.780 imóveis com déficit florestal e mais de 4 módulos fiscais.

Palavras-chave: *Corredores Florestais; Sistema Cantareira; Projetos de Carbono.*

Research Line: Landscape and environmental planning**MAPPING OF PRIORITY AREAS FOR FOREST RESTORATION IN THE PCJ****BASINS (PIRACICABA, CAPIVARI AND JUNDIAÍ)**

Marco Antonio Martins¹, Sueli Angelo Furlan¹

¹University of Sao Paulo, Department of Geography

marco.antonio.martins@usp.br

Abstract

In this work, the potential in area (ha) of restoration was calculated from Legal Reserves and Permanent Preservation Areas (APP) of 19,946 rural properties located in the municipalities covered by the PCJ Basins (Piracicaba, Capivari and Jundiaí), including the entire territory of the Cantareira System. The analyzes included the contribution of these properties to the climate and biodiversity, based on the calculation of CO₂ storage potential and mapping of fauna and flora species. For this, the Hierarchical Process Analysis (AHP) method was used, and geoprocessing modeling was applied so that the mapping took into account variables from the Brazilian Forest Code (Law No. 12,651, of May 25, 2012.), as well as forest connectivity metrics and land use and cover with data from MapBiomass. The results consist of a database of properties indicating their potential (ha) for restoration and storage of CO₂, in addition to mapping forest fragments according to their connectivity in the landscape. The analysis indicated a potential for storing tons of CO₂ per hectare of 35,977,903 (Tco₂eq/ha) and a potential for forest restoration of 55,202 ha, distributed across 1,780 properties with forest deficit and more than 4 fiscal modules.

Key-words: *Forest Corridors; Cantareira System; Carbon Projects.*

Introdução

A existência de coberturas florestais conservadas interfere em aspectos quantitativos e qualitativos da disponibilidade de água em bacias hidrográficas, promovendo a regulação do fluxo dos rios, interceptando a água da chuva, controlando processos erosivos superficiais, diminuindo a contaminação dos rios por sedimentos e, conseqüentemente, melhorando a qualidade da água (DE ASSIS e FURLAN, 2015; HONDA e DURIGAN, 2017).

Estudos sugerem que as bacias em que ocorrem eventos de diminuição da qualidade e disponibilidade de água estão predominantemente localizadas em áreas que passaram por processos intensos de ocupação e transformação da paisagem natural, tendo como um dos indicadores a supressão da cobertura florestal (COELHO et al., 2021).

Nas florestas, o processo em que uma grande extensão de habitat é suprimida e transformada manchas isoladas é chamado de fragmentação (DE ASSIS e FURLAN, 2015). Entre as definições desse conceito, se encontra o de Wilcove et al. (1986), que compreende a fragmentação como a diminuição de uma cobertura florestal em várias manchas menores, de modo que a soma da área das manchas menores seja menor do que a área total da floresta originária.

A recuperação de paisagens florestadas em bacias hidrográficas pode ser abordada através do conceito de “gargalos”, sendo esses representados pelas áreas em que havia ligações estruturais e funcionais de floresta originária e que em um dado período histórico perderam tais ligações para dar lugar a outros tipos de uso e cobertura da terra (METZGER, 2010; DE ASSIS e FURLAN, 2015; SILVA et al., 2021).

Localizado nas Bacias PCJ (Piracicaba, Capivari e Campinas) e na Bacia do Alto Tietê, o Sistema Cantareira é o maior manancial de abastecimento hídrico da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e um dos maiores sistemas de abastecimento público a nível mundial. Historicamente, o sistema passou por processos intensos de pressão antrópica, mais especificamente pela retirada de parte da vegetação nativa para o estabelecimento das atividades de café e agropecuária que foram implementadas nos séculos XVIII, XIX e XX. Atualmente o Sistema Cantareira apresenta apenas 21% de seu território coberto por vegetação nativa e alto grau de fragmentação florestal (DE ASSIS e FURLAN, 2015; GRAY et al., 2019). Neste contexto, uma série de estudos e iniciativas de restauração vêm sendo propostos para o Cantareira e Bacias PCJ. Em 2013 foi desenvolvido o Projeto Semeando Água do Instituto de Pesquisas Ecológicas (IPÊ), além do Programa Nascentes da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São

Paulo (SIMA/SP). Esses projetos visam promover práticas sustentáveis em propriedades rurais, incentivando a conservação das bacias hidrográficas por meio da recuperação da vegetação nativa (SILVA et al., 2019; DIB et al. 2020).

No âmbito das potencialidades da restauração florestal, também é desenvolvido o projeto Pró-Restaura, que desde 2021 busca mapear as regiões prioritárias para restauração nos biomas da Amazônia e Mata Atlântica, além de fornecer estimativas de sequestro de dióxido de carbono (CO₂) nesses biomas. O estudo é coordenado pelo World Resources Institute (WRI) e pelo Instituto Internacional para Sustentabilidade (IIS) (STRASSBURG, 2022).

Dessa forma, no contexto de iniciativas de recuperação da vegetação nativa, os mapeamentos de áreas para a restauração podem ser utilizados como suporte para o planejamento ambiental em bacias hidrográficas, e seus benefícios incluem o incentivo ao cumprimento da legislação ambiental, a indicação de áreas para compensação de licenciamento ambiental e a localização de áreas para corredores florestais (STRASSBURG, 2022).

Metzger (2010) indica que a elaboração desses mapeamentos deve levar em consideração os marcos legais que orientam a forma de ordenamento ambiental do território, entre eles a Lei de Proteção da Vegetação Nativa do Brasil (LPVN) (Lei N° 12.651, de 25 de maio de 2012), além de dados de uso e cobertura da terra, fornecendo suporte para a identificação de propriedades com déficit florestal.

O mapeamento também deve ser composto por variáveis ecológicas, de modo que a partir da identificação das áreas com déficit florestal, seja indicada qual a melhor localidade para alocar a recuperação da vegetação nativa, considerando a contribuição dos remanescentes florestais no aumento da conectividade florestal. Para isso, um dos índices que vêm sendo utilizado em análises de conservação florestal é o de conectividade florestal, aplicado através de softwares como o Conefor e V.Late (CASTRO et al., 2020; QI et al., 2021).

O cálculo de índices de conectividade pode ser incorporado em softwares de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e considera o tamanho e a distância entre os fragmentos florestais para identificar o grau de conectividade florestal de uma determinada paisagem, assim como o grau de importância de cada fragmento da paisagem para a conservação da biodiversidade (GRANDE e AGUIAR; MACHADO, 2020; QI et al., 2021).

A análise desses mapas pode ser efetuada através da classificação hierárquica das áreas para restauração, dessa forma, os métodos de Análise Multicritério de Decisão (AMD), associados à Análise Hierárquica de Processo (AHP) em SIG, funcionam como uma cartografia de síntese

ambiental, e vêm sendo aplicados para modelar cenários ecológicos que dependem da consideração de variáveis diversas. A aplicação da AMD leva em conta a atribuição de peso para as camadas do mapa, permitindo que essas áreas sejam hierarquizadas em sua importância para a conservação ambiental (SANTOS e VENTORINI, 2018; PIMENTA et al., 2019).

Este trabalho está inserido na temática exposta, uma vez que tem como proposta realizar a análise das áreas prioritárias para a restauração florestal em propriedades rurais das Bacias PCJ. Para isso, o método AHP será utilizado e serão aplicadas técnicas de geoprocessamento e modelagem espacial para que o mapeamento seja baseado em variáveis da legislação ambiental brasileira, métricas da conectividade florestal e de uso e cobertura da terra. Os resultados abrangem a avaliação das propriedades identificadas com déficit florestal, a análise do potencial em hectares (ha) de restauração e a estimativa do sequestro de toneladas de CO₂ das Bacias PCJ.

Área de estudo

O sistema de bacias PCJ está localizado no estado de São Paulo, abrangendo 76 municípios, sendo 71 no estado de São Paulo e 5 no estado de Minas Gerais (UEZO, 2017). A área de drenagem da região é de aproximadamente 1.417.800 ha. A área é composta por cinco reservatórios, abrangendo as bacias hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí: reservatórios Piracicaba, Atibaia, Jacaré, Atibainha e Cachoeira, sendo os 4 últimos pertencentes ao Sistema Cantareira. O Sistema Cantareira tem capacidade de produção de água é de 33 mil litros por segundo, sendo o sistema responsável por abastecer a Região Metropolitana de Campinas (RMC) e a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), fornecendo água para 8,8 milhões de pessoas (WHATELY, 2008) (Figura 1).

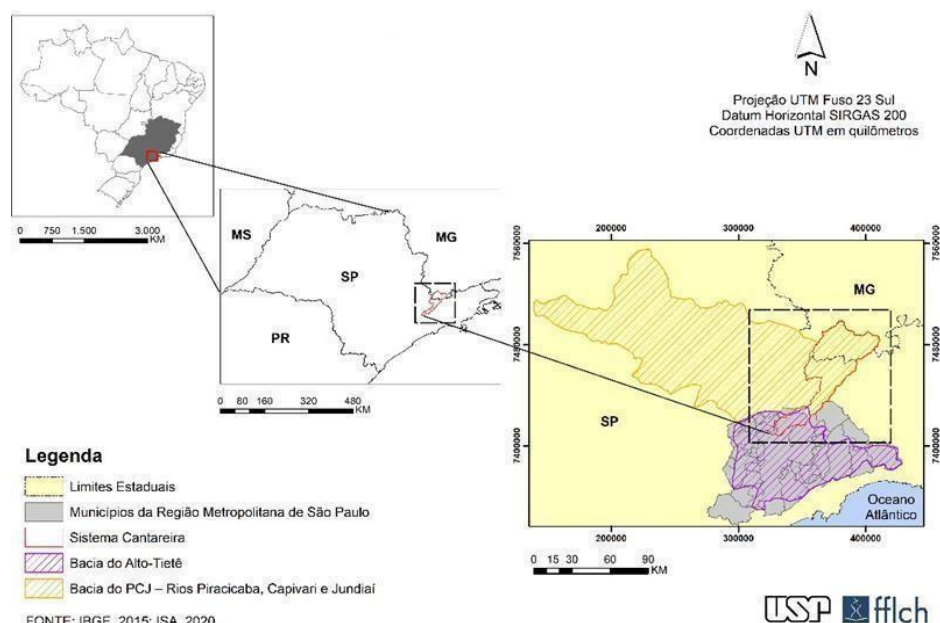


Figura 1. Localização da área de estudo.

A área das Bacias PCJ é composta por um mosaico de unidades de conservação (UCs), de jurisdição federal, estadual e municipal, sendo caracterizada pelo bioma de Mata Atlântica, com presença das fitofisionomias de Floresta Ombrófila Densa e Floresta Estacional Semidecidual. A região é considerada prioritária para iniciativas de conservação florestal por ser declarada como um hotspot de biodiversidade com espécies de flora e fauna ameaçadas de extinção, como a Palmeira-juçara (*Euterpe edulis*) e a Onça-parda (*Puma concolor*) (WHATELY, 2008; DE ASSIS e FURLAN, 2015).

Na região afloram rochas metamórficas do Pré-Cambriano e rochas Cenozóicas, com predominância de Latossolos, Argissolos e Cambissolos. O relevo é caracterizado como ondulado de médio a forte e apresenta alta suscetibilidade a processos erosivos, intensificado pelo desmatamento da vegetação nativa (RODRIGUES e VILLELA, 2016; UEZO et al., 2017).

O clima é classificado como Cwb, apresentando verões quentes e úmidos e invernos frios e secos. Anualmente, as temperaturas médias apresentam variação de 18° C a 20° C e a pluviosidade média é de aproximadamente 1.570 mm. Nos últimos anos foram registrados volumes menores de precipitação pluviométrica e em janeiro de 2015 os níveis das represas do sistema apresentaram apenas 5% da capacidade de armazenamento total (982,07 bilhões de litros) (RODRIGUES e VILLELA, 2016; UEZO et al., 2017).

Material e Métodos

Variáveis

Foram aplicadas 7 variáveis para analisar as áreas prioritárias para restauração florestal. A escolha das variáveis foi baseada em estudos que caracterizam as propriedades com áreas de solo exposto, alta declividade do relevo e presença de déficit florestal como áreas prioritárias para a restauração de florestas, por apresentarem maior fragilidade ambiental (DE ASSIS e FURLAN, 2015) (HONDA e DURIGAN, 2017).

Com base de Metzger (2012) e De Assis e Furlan (2015), as variáveis foram utilizadas em duas etapas do projeto, sendo elas:

- 1º etapa – Identificação de áreas prioritárias para restauração florestal
 - 1 – Propriedades rurais com mais de 4 Módulos Fiscais e com déficit florestal de acordo com a Lei N° 12.651, de 25 de maio de 2012;
 - 2 – Áreas de Preservação Permanente;
 - 3 – Vegetação nativa remanescente;
 - 4 – Outras áreas não vegetadas;
 - 5 – Baixo vigor de pastagem;
 - 6 – Declividade.
- 2º etapa – Análise estratégicas dos territórios (clusters) prioritários para alocar iniciativas de restauração
 - 7 Remanescentes florestais prioritários para a conservação da biodiversidade.

Variável 1 – A obrigatoriedade de restauração não é uniforme para todos os tipos de propriedades, variando conforme os tipos de propriedades (Imóveis rurais, assentamento, povos e comunidades tradicionais) e o tamanho do módulo fiscal do município em análise. A LPVN (Lei No 12.651, de 25 de maio de 2012) estabelece que as atividades de readequação ambiental das propriedades com menos de 4 módulos fiscais diferem das obrigações legais das propriedades de maior abrangência territorial. Objetivando realizar a modelagem para iniciativas de restauração de larga escala, nesse projeto foram prospectadas as propriedades rurais com mais de 4 módulos fiscais, que tem obrigatoriedade de apresentar Reserva Legal. Para identificar essas propriedades, foi feito o

levantamento da área de módulo fiscal em hectares por município, posteriormente foi feito o cálculo de multiplicação do módulo fiscal por 4 e efetuada a associação dessas informações na tabela de atributos da base de propriedades.

Variável 2 – As APPs foram selecionadas baseando-se nas premissas da LPVN (Lei N° 12.651, de 25 de maio de 2012) de que as áreas de Reservas Legais e Áreas de Preservação Permanente (APP) devem ser conservadas e restauradas. Dessa forma, essa variável foi estipulada com base em critérios da legislação ambiental brasileira.

Variável 3 – A vegetação remanescente é uma variável ecológica do projeto e sua inclusão ocorre objetivando a diminuição do efeito de fragmentação e de gargalos da paisagem. Essa variável foi aplicada de forma que a modelagem considerasse a alocação das áreas de restauro nas localidades próximas de fragmento florestais, objetivando formar corredores florestais entre os remanescentes e as propriedades e entre as propriedades dos territórios analisados.

Variável 4 – A variável de outras áreas não vegetadas é uma classe de Uso e Cobertura a Terra da Publicação Mapbiomas (2023) e de acordo com a nota técnica da publicação, essas áreas são representadas em sua grande parte por áreas de solo exposto (desmatamento por corte raso, voçorocas, movimento de massa etc.). Dessa forma, essa variável foi incluída no projeto de forma que a restauração florestal priorizasse a recuperação de áreas degradadas.

Variável 5 – As áreas de pastagem com baixo vigor foram selecionadas considerando que em um cenário de déficit florestal, essas áreas podem ser utilizadas para a restauração da propriedade, tendo um peso maior do que as áreas produtivas com alto vigor de pastagem. Essas premissas foram baseadas em Uezo (2017), objetivando promover adequação ambiental e agrícola da área analisada.

Variável 6 – A variável declividade foi priorizada de forma que a alocação das áreas para restauro fosse orientada conforme as premissas de adequação agrícola e ambiental de Uezo (2017). Dessa forma, foi priorizada a realocação das áreas de Reserva Legal das propriedades nas áreas com maior declividade e com mais de 20% de declividade, que compõem áreas com baixa aptidão agrícola.

Variável 7 – Essa variável foi considerada para estabelecer critérios de prioridade de restauração das propriedades, de forma que fossem priorizadas as propriedades inseridas ou próximas de fragmentos importantes para a conservação da biodiversidade. A importância desses fragmentos foi baseada em métricas da Ecologia de Paisagem, sendo as principais a área (ha) e a proximidade. Nesse cenário, as florestas com maior área (ha) e mais conectadas são prioritárias para a alocação de corredores florestais, pois apresentam distâncias entre si que permitem o fluxo da biodiversidade. De acordo com a literatura na área da restauração (PAESE et. al, 2012), foi aplicada uma regra para que

considerasse os fragmentos que estão conectados em um raio de no máximo 500 metros em relação aos outros fragmentos. Ao utilizar essas variáveis para a composição do mapeamento, o projeto teve como objetivo indicar que as localidades mais apropriadas para as atividades de restauração florestais são as áreas próximas de APP e de fragmentos florestais grandes e conectados entre si.

Método

A AHP é um modelo proposto por Saaty (1980) objetivando fornecer pesos no uso de variáveis. A atribuição de peso é baseada em uma lógica de análise par a par, em que as variáveis são utilizadas de forma hierárquica de acordo com a sua importância para a realização de um diagnóstico. Nesse modelo, além de serem comparadas entre si, as variáveis necessitam de um peso que representa a importância com que essa variável exerce sobre o diagnóstico (JÚNIOR e RODRIGUES, 2012).

No contexto da identificação de áreas para restauração nas Bacias PCJ, as variáveis analíticas foram comparadas entre si de forma que foram atribuídos pesos de importância a cada uma delas. Além disso, conforme prevê o método, essas variáveis foram comparadas entre si, de forma a responder qual delas tem maior peso para a definição de áreas prioritárias para a conservação e restauração florestal. A atribuição dos pesos foi baseada em Chazdon (2008; 2009), Paese (2012) e Uezo (2017), e considera a importância das variáveis de ordenamento legal do território sobre as demais, em segundo grau de importância ocorre as variáveis relacionadas a processos ecológicos como a conectividade florestal, e por último grau de importância estão as variáveis que priorizam a restauração de acordo com aptidão agrícola da propriedade, como as pastagens de baixo vigor e as áreas agrícolas em terrenos de alta declividade.

A escolha de áreas prioritárias para a restauração florestal envolve a recuperação da vegetação nativa partindo do cenário em que a área restaurada será equivalente ao tamanho da RLs e APP da propriedade, objetivando, portanto, a realocação das RLs nos casos em que a propriedade apresenta déficit florestal. Nesse cenário, o diagnóstico envolve variáveis que afetam de forma negativa o ecossistema, dessa forma, a aplicação da AHP para identificação das áreas com maior déficit florestal e com menor aptidão agrícola foi utilizada para modelar cenários de restauração em larga escala e na prevenção de danos ao ecossistema (JÚNIOR e RODRIGUES, 2012).

A aplicação do método AHP pode ser sintetizada em 3 etapas:

- 1– Estruturação da hierarquia para fomentar a decisão;
- 2 – A elaboração de uma matriz de comparação pareada – aplicação de análise de comparação par a par (importância de cada variável) e realização do cálculo de consistência;
- 3 – Análise dos pesos finais de cada variável e definição das classes utilizadas para o mapeamento em ambiente SIG (SILVA e NUNES, 2009).

Para a identificação das áreas prioritárias para restauração florestal, foi adotado o método de Análise Hierárquica de Processos (AHP) no âmbito da Análise Multicritério de Decisão (AMD), que possibilita a modelagem ambiental das variáveis fundiárias, ecológicas e da legislação ambiental. O presente trabalho utiliza os princípios da AHP proposta por Saaty (2016), Pimenta et al. (2019), Santos et al. (2021) e Zacharias (2021) que utilizaram esse método em estudos com SIG para efetuação de modelagens ambientais em bacias hidrográficas.

Com base em De Assis e Furlan (2015), Honda e Durigan, (2017), Silva et al. (2019) e Silva et al. (2021), as variáveis utilizadas para o mapeamento foram analisadas e receberam pesos que refletem sua importância na alocação de áreas para a restauração florestal.

Softwares e equipamentos

Os softwares de SIG utilizados na pesquisa foram o QGIS e o ArcGIS, sendo o primeiro destinado para procedimentos de análise espacial, cruzamento e mensuração de dados, e o segundo destinado para calcular o grau de relevância ambiental dos fragmentos florestais nas propriedades, através do plugin V-LATE, utilizado para calcular o índice de conectividade florestal. A ferramenta Google Earth Engine foi utilizada para o processamento e obtenção de dados de uso e cobertura da terra e da qualidade da pastagem.

A ferramenta Model Builder foi utilizada para automatizar os processos de Geoprocessamento no QGIS, consistindo em um modelador gráfico que permite automatizar tarefas de processamento de dados. Também foi construído um script para rodar os processamentos espaciais com linguagem de programação R, de forma a disponibilizar a metodologia abertamente e permitir a aplicação da análise espacial para viabilidade de projetos de restauração de larga escala.

Procedimentos Metodológicos

1. Levantamento de propriedades e cálculo de déficit florestal

Para a estimativa do potencial de restauração, foi construída uma base de propriedades a partir do levantamento das bases do SICAR e do INCRA, sendo considerados os limites dos imóveis cadastrados nos 76 imóveis das Bacias PCJ, além dos limites das APPs definidos pela Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS) com base na LPVN (Nº 12.651, de 25 de maio de 2012). Realizado o levantamento, foi efetuado o recorte espacial de forma que a base de propriedades e APPS fosse restrita aos limites das Bacias PCJ, excluindo as propriedades que pertencem ao território dos municípios, mas que não se encontram no perímetro das bacias PCJ.

Para a execução das estimativas, o limite das bacias PCJ foi considerado como o perímetro de uma região de projeto para iniciativas de carbono de larga escala, de forma que as estimativas do projeto possam ser comparadas com outras estimativas de restauração e carbono realizadas com as mesmas premissas por pesquisadores, ONGs ou outras instituições. Nesse sentido, o perímetro das bacias PCJ representa o limite espacial da análise e as propriedades e demais análises espaciais fora desse limite não foram incluídas.

A identificação das propriedades que necessitam de restauração florestal foi amparada nos critérios da LPVN (Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012). Para o bioma de Mata Atlântica, a lei ambiental federal estabelece que 20% da área das propriedades rurais deve abranger coberturas vegetadas declaradas como uso de Reserva Legal.

Nessa etapa, foi calculado a área (ha) de Reserva Legal que cada propriedade deve manter com vegetação, sendo aplicado um cálculo simples de divisão da área (ha) das propriedades por 5.

Com o QGIS, as informações de área (ha) obrigatória de Reserva Legal e APP foram incorporadas em uma base de dados contendo dados das propriedades rurais das Bacias PCJ. Em seguida, com a ferramenta Intersect, as áreas de formação florestal do MapBiomas presente nas propriedades foram recortadas e calculadas, permitindo que essas informações fossem incorporadas na base de imóveis através da ferramenta de junção de tabelas. O procedimento final dessa etapa consistiu no cruzamento dessas informações para o cálculo de déficit florestal, com a ferramenta Field Calculator. Na base de dados, todas as propriedades foram identificadas pelas seguintes informações: código do imóvel registrado no SICAR, código do estado, código do município, tipo de imóvel, situação do cadastro no SICAR/INCRA, condição do cadastramento SICAR/INCRA, área (ha) do imóvel, área (ha) de floresta, área (ha) de APP, área (ha) de APP com floresta, área (ha) de déficit florestal de APP, área (ha) de RL, área (ha) de RL com floresta, área (ha) de déficit florestal, área (ha) de déficit total (RL e APP), e por fim, indicativo de obrigatoriedade ou dispensabilidade de restauração florestal.

Com base no Artigo 15 da LPVN (Lei N° 12.651, de 25 de maio de 2012) que permite que as APPS com vegetação sejam utilizadas para compor o cálculo de percentual de RL, as áreas dos limites de APP com vegetação foram subtraídas das áreas de passivo de RL. Dessa forma o dado de passivo florestal das propriedades e da zona do projeto é resultado da soma dos passivos de RL e de APP.

2. Cálculo de distância das APPs

O limite das APPs foi obtido através da Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS), com métricas calculadas a partir do sistema previsto na LPVN (N° 12.651, de 25 de maio de 2012).

Além de serem analisados na escala de cada propriedade, os limites vetoriais das APPs foram unificados com base na região das Bacias PCJ e foram transformados em uma base raster. Em seguida, foi realizada o cálculo de distância euclidiana da base raster, resultando em uma base que expressa os valores de pixels das bacias PCJ conforme a ocorrência e proximidades das APPs.

3. Cálculo de distância da vegetação remanescente nativa

A classe formação florestal foi utilizada para identificar os fragmentos de Mata Atlântica na região das Bacias PCJ, incluindo a vegetação nas propriedades rurais e áreas protegidas com unidades de conservação. No QGIS, foi calculada a distância euclidiana dos remanescentes florestais, de forma que as áreas próximas de fragmentos apresentassem um peso maior na alocação dos pixels dos corredores florestais.

4. Cálculo de distância da classe de “outras áreas não vegetadas”

A análise de outras áreas não vegetadas (solo exposto) foi obtida através do MapBiomas. A partir desse dado, foi elaborada uma camada raster de distância euclidiana, categorizando a área de estudo a partir da distância em metros da classe de desmatamento por corte raso, voçorocas, movimentos de massa, entre outras causas para ocorrência de solo exposto.

5. Análise das áreas de baixo vigor de pastagem

A identificação das áreas de vigor de pastagem foi obtida através do MapBiomas no Google Earth Engine. Após o levantamento do dado, as classes de vigor de pastagem de média e alta qualidade foram excluídas, de forma que o modelo de alocação da restauração priorizasse as áreas com menor qualidade de pastagem. Em seguida, foi realizado o cálculo de distância euclidiana para a classe de baixo vigor de pastagem.

6. Análise de declividade

A declividade do relevo foi incorporada e analisada no estudo a partir de uma camada raster de Modelo Digital de Elevação (MDE). A camada tem 30 metros de resolução espacial e foi produzida pelo Instituto Geológico do Estado de São Paulo. O levantamento foi realizado no portal da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo (SEMIL/SP). Para a análise da região das bacias PCJ localizada em Minas Gerais, foi realizado o levantamento da base MDE elaborada pelo INPE (Projeto Topodata), que possui 30 metros de resolução espacial.

Com as bases de MDE, foi elaborado um mosaico para a região das Bacias PCJ e utilizada a ferramenta de reclassificação em porcentagem para que os dados de elevação fossem transformados em percentual de declividade. As classes de declividade foram baseadas no modelo proposto pela Embrapa (1979), conforme abaixo (Figura 2):

Declividade (%)	Relevo	ID
0 - 3	Plano	1
3 - 8	Suave-ondulado	2
8 - 20	Ondulado	3
20 - 45	Forte-ondulado	4
45 - 75	Montanhoso	5
> 75	Forte-montanhoso	6

Figura 2. Classes de declividade – adaptado de EMPRAPA (1979).

7. Análise dos remanescentes prioritários para restauração florestal

Essa etapa do trabalho consistiu em aplicar o Índice de Conectividade e essa camada foi obtida através da utilização do ArcGIS. O procedimento consistiu na vetorização da camada raster de

remanescentes florestais para que fosse calculada as áreas e as distâncias em metros entre fragmentos na elaboração do índice. O Plugin utilizado foi o V-LATE (Vector-based Landscape Analysis Tools Extension), que opera com arquivos vetoriais de forma a armazenar as métricas de Ecologia da Paisagem na tabela de atributos dos dados.

Para o processamento de dados foram considerados estudos sobre dispersão e fluxo de biodiversidade na Mata Atlântica, objetivando que os remanescentes prioritários com valor máximo para a conservação apresentassem distâncias entre si que viabilizassem o fluxo da biodiversidade. De acordo com a literatura na área da restauração (PAESE et al, 2012), foi aplicada uma regra para que o V-LATE considerasse os fragmentos que estão conectados em um raio de no máximo 500 metros em relação aos outros fragmentos. Dessa forma, todos os fragmentos foram analisados e os que não tiveram fragmentos vizinhos em um raio de 500 metros foram considerados mais isolados.

8. Modelagem das áreas prioritárias para restauração florestal

Para a alocação das áreas de restauro, cada variável raster passou pelo processo de normalização, em que os valores numéricos dos pixels foram transformados para serem representados entre o intervalo de 0 a 1. Esse procedimento foi realizado para permitir que as camadas fossem superpostas e os valores dos pixels fossem somados de forma a indicar as áreas para restauro. Desse modo, os valores próximos de 0 representam as localidades menos prioritárias para restauração e os valores próximos de 1 indicam as áreas prioritárias. Para a superposição das camadas em ambiente SIG, foi realizada a atribuição de valores a cada variável, de acordo com o método da AHP. A atribuição dos pesos de importância pode ser observada na Figura 3, em que os dados as linhas ponderam sobre as colunas.

	APP	Vegetação	Outras áreas não vegetadas	Pastagem com Declividade baixo vigor	Declividade alta
APP	1	3	5	9	8
Vegetação	1/3	1	3	6	5
Outras áreas não vegetadas	1/5	1/3	1	2	2
Pastagem com baixo vigor	1/9	1/6	1/2	1	2
Declividade	1/8	1/5	1/2	1/2	1

Figura 3. Avaliação de pesos das variáveis.

Com base em Chazdon (2008; 2009), e Uezo (2017), esse esquema foi avaliado considerando grau de importância das variáveis das linhas em relação às variáveis das colunas, considerando o seu papel na delimitação de áreas para conservação e restauração florestal em propriedades rurais. Os pesos foram considerados conforme a Figura 4.

Valor da importância	Definição
1	Igual
2	Um pouco melhor
3	Algo melhor
4	Moderadamente melhor
5	Melhor
6	Bem melhor
7	Muito melhor
8	Criticamente melhor
9	Absolutamente melhor

Figura 4. Escala de valoração comparativa (SAATY, 1991).

Considerando que o método da AHP é baseado na atribuição de uma valoração qualitativa, para garantir a consistência dos pesos da avaliação foi calculada a Razão de Consistência (RC). Dessa forma, com base em Saaty (2016), os resultados foram analisados de forma que um valor de consistência lógica inferior a 0,10 indica uma matriz aceitável e um resultado maior que 0,10 aponta uma necessidade de revisão da matriz de comparações.

Os valores de validação da análise podem ser observados na Figura 5, que indicou uma RC de 0,4. O peso final de cada variável no mapeamento é expresso pela coluna “Autovetor (W)”.

	Soma das Linhas	Auto vetor (W)	Número Critérios	Produto Vetorial	Lambda	Lambda (λ) Máximo (autovalor)	IC (Índice de Consistência)	IR (Índice Randômico)	RC (Razão de Consistência)
APP	26,00	0,49	5	2,87	5,86	5,19	0,05	1,11	0,0421
Vegetação	15,33	0,29		1,41	4,88				
Outras áreas não vegetadas	5,53	0,10		0,53	5,07				
Pastagem com baixo vigor	3,78	0,07		0,31	4,40				
Declividade	2,33	0,04		0,25	5,72				

Figura 5. Peso e consistência das variáveis.

9. Estimativa de sequestro de CO₂

O cálculo para estimativa de sequestro de CO₂ leva em consideração a tipologia de vegetação na área de estudo e a capacidade da vegetação de remover CO₂ da atmosfera. Com base em Lenti (2017), Azevedo et al. (2018), Silva et al. (2018) e Alencar et al. (2020), esse procedimento foi efetuado a partir da classe de Formação Florestal do MapBiomass, enquanto a taxa de incremento de biomassa para cálculo de remoções de CO₂ foi obtida de valores publicados no Terceiro Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (GEE) do Ministério da Ciência Tecnologia e Inovações (2016), baseada na metodologia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

Na região das Bacias PCJ, caracterizada pelas fitofisionomias de Floresta Ombrófila Densa e Floresta Estacional Semidecidual, a estimativa para regeneração natural de uma área com vegetação nativa é de 30 anos, sendo o estoque de carbono (C) de uma floresta regenerada de 177.75 toneladas por ha (ALENCAR et al., 2020). Dessa forma, para avaliar o potencial de sequestro de CO₂ da área de estudo, foi utilizado o valor de sequestro de C pela vegetação indicado por Lenti (2017), e em

seguida realizada a conversão de C para remoções de CO₂ por meio da constante 44/12, conforme a seguinte equação:

$$R = \text{Incr} \times A \times 44/12$$

Onde:

R: toneladas de CO₂ removida da atmosfera pela vegetação na área de estudo (TCO₂/ano);

Incr: valor de tonelada de C da vegetação;

A: área (ha) do potencial de restauração florestal; 44/12: razão entre a massa molar do CO₂ e do C.

Resultados e Discussões

Os resultados consistiram em:

- Elaboração de base de dados contendo informações de 19.946 imóveis (área de RL, área de APP, área de vegetação, módulos fiscais, município e déficit florestal);
- Identificação das propriedades que tem mais de 4 módulos fiscais e possuem déficit florestal na propriedade, totalizando 1.780 imóveis e um déficit florestal de 55.202 ha (Figura 6);
- Elaboração das camadas das variáveis e na superposição das camadas para a elaboração do mapeamento de áreas prioritárias para a restauração florestal no Sistema Cantareira (Figura 7).

Quantidade de municípios – ocorrência de imóveis com 4 MF e déficit florestal	69 municípios
Quantidade de imóveis com 4 MF e déficit florestal	1780 imóveis
Área de Reserva Legal (ha) – imóveis com 4 MF e déficit florestal	106.506 ha
Área de APP (ha) - imóveis com 4 MF e déficit florestal	79.943 ha
Déficit florestal total (ha) – imóveis com 4MF e déficit florestal	55.202 ha
Potencial de armazenamento de CO2 (Tco2eq/ha)	35.977.903

Figura 6. Dados de déficit florestal – Bacias PCJ.

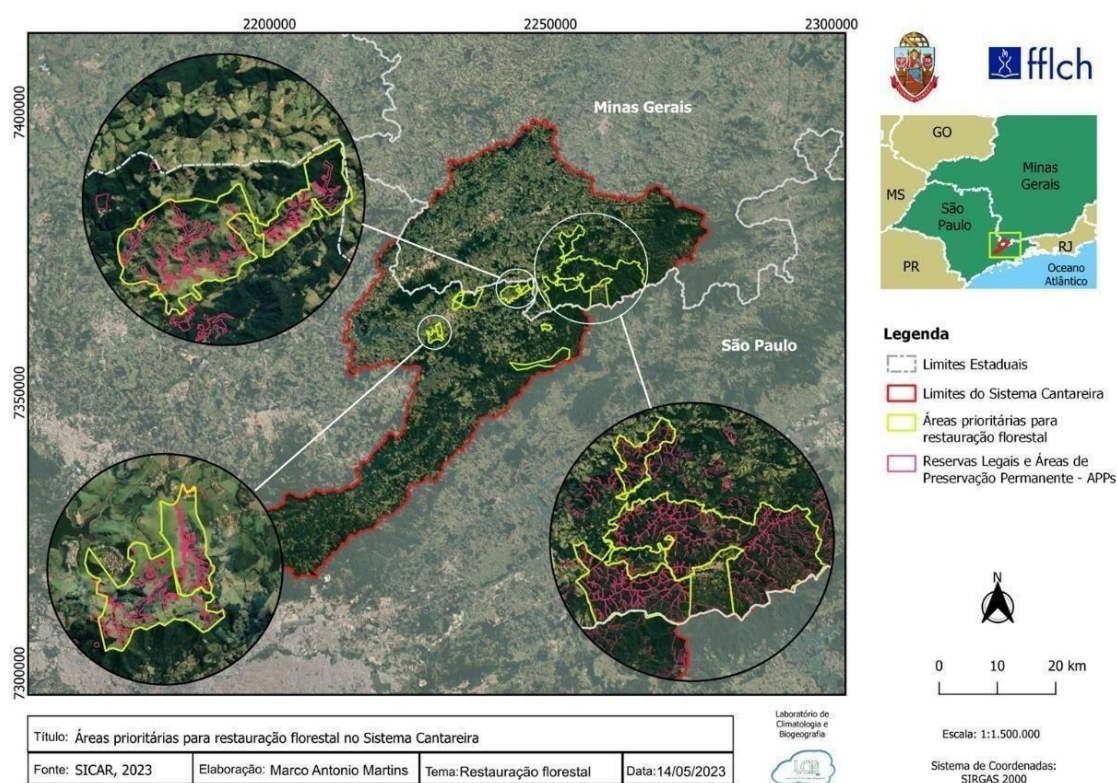


Figura 7. Áreas prioritárias para restauração – Cantareira.

A Figura 8 apresenta os fragmentos prioritários para a conservação da biodiversidade na região das Bacias PCJ, considerando as métricas de tamanho e isolamento dos fragmentos.

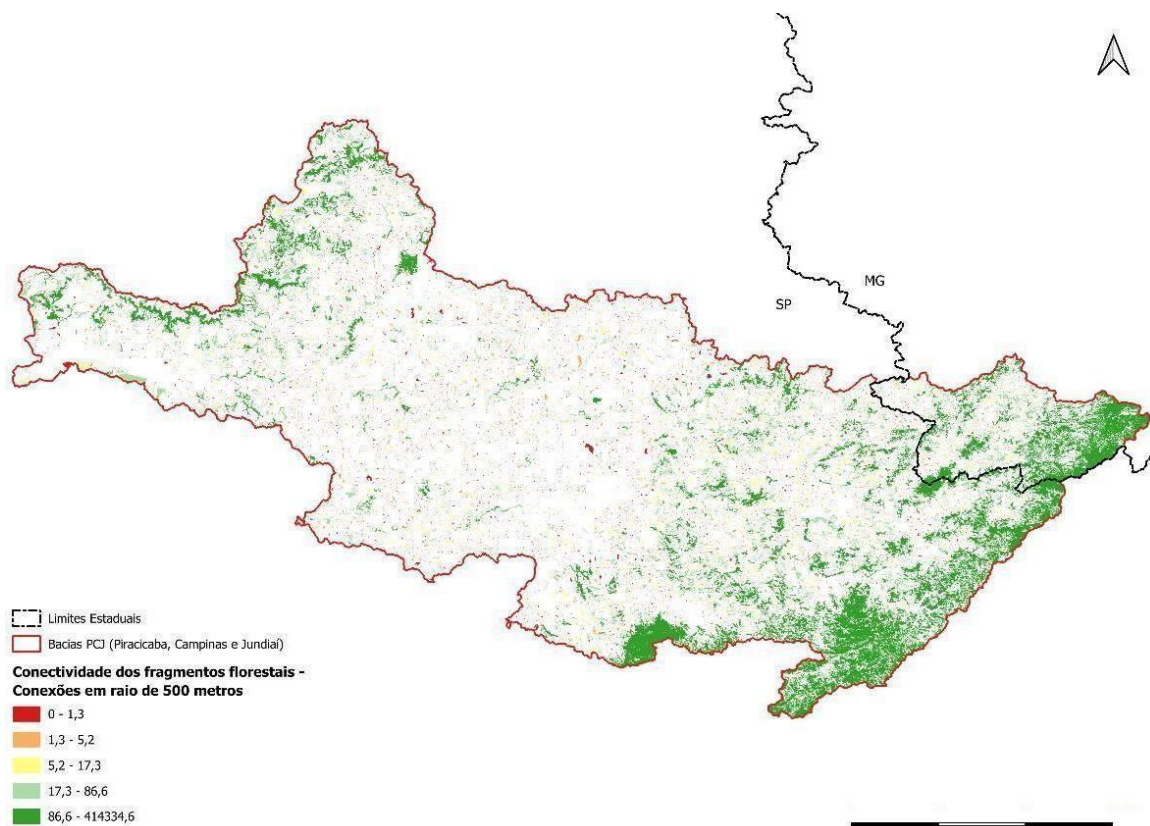


Figura 8. Análise de conectividade florestal – Plugin V-Late.

A Figura 9 representa as classes de tamanho (ha) de fragmentos florestais distribuídos conforme o seu grau de conectividade, indicando que a maior parte dos fragmentos das Bacias PCJ são fragmentos de tamanho médio e conectividade alta. No extremo, os fragmentos muito grandes e muito pequenos tendem a ser mais isolados.

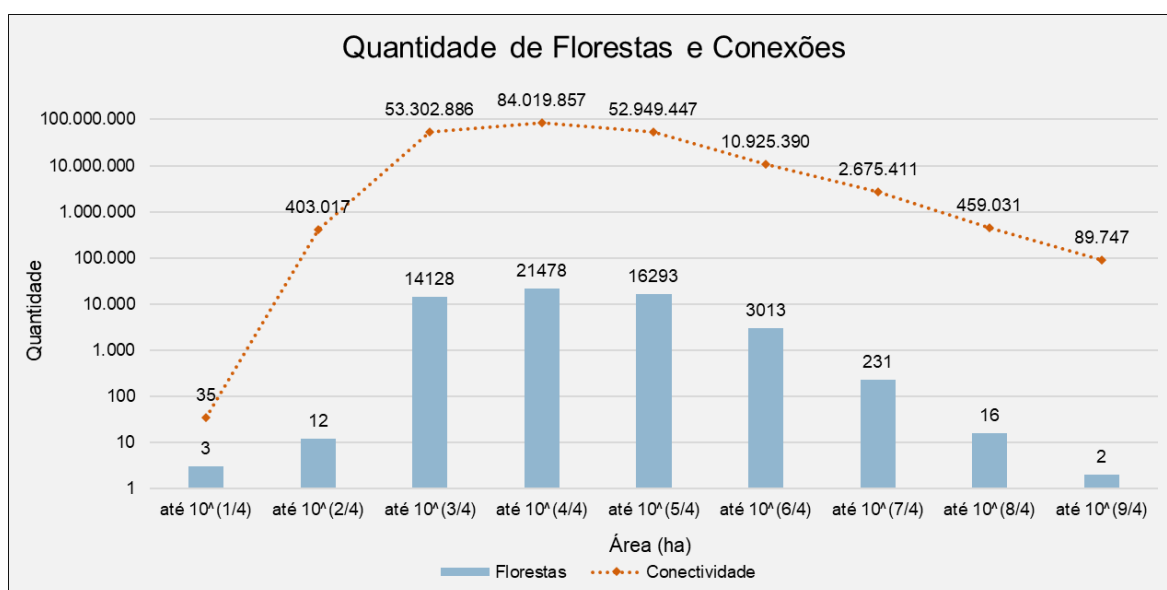


Figura 9. Distribuição de florestas em área (ha) e conectividade.

Considerações Finais

Ao considerar o limite das bacias PCJ como um perímetro de uma região de projeto destinada a projetos de carbono em larga escala, pode ser realizada a comparação das estimativas deste trabalho com outras estimativas de restauração e carbono feitas por pesquisadores, ONGs ou outras instituições, utilizando as mesmas premissas. Neste sentido, o pacote R desenvolvido para análise e modelagem de territórios pode auxiliar na identificação e mensuração de territórios e suas contribuições para o clima e biodiversidade.

Em relação aos fragmentos prioritários para a conservação da biodiversidade, é importante destacar que a análise se baseia na premissa de que fragmentos menores e mais isolados tendem a abrigar menos espécies, e seu isolamento dificulta a dispersão e o fluxo de biodiversidade. Apesar de não terem sido considerados aspectos como o grau de degradação dos fragmentos florestais, essas características foram escolhidas com base em estudos prévios na Mata Atlântica. A aplicação do dado de conectividade não interferiu na alocação das áreas prioritárias para a restauração, entretanto, essas informações podem ser cruzadas com os limites das propriedades rurais e municipais, potencializando a sua função para identificar áreas prioritárias (clusters) de biodiversidade que necessitam de corredores florestais. Isso também fomenta a criação de zonas de tampão e promove a diminuição do efeito de gargalo e borda nos fragmentos.

Cabe destacar ainda que esse mapeamento apresenta potencial para implementação de corredores florestais, pois pode ser cruzado com dados espaciais de propriedades com déficit florestal, Unidades de Conservação, represas e bases de dados de biodiversidade disponibilizados pelo estado de São Paulo.

Por último, em relação aos valores de validação da AHP, o peso final de cada variável no mapeamento expresso pela coluna “Autovetor (W)” indica que as Áreas de Preservação Permanente (APPs) apresentaram prioridade na alocação de áreas para restauração, seguidas pelos remanescentes florestais, outras áreas não vegetadas e variáveis de pastagem com baixo vigor e alta declividade. Os valores dessa coluna somam 1, correspondendo ao valor atribuído às áreas prioritárias para a restauração florestal nas propriedades.

Referências

- ALENCAR, Ane, et al. Nota Metodológica SEEG 8 Mudança de Uso da Terra e Florestas, Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), Belém, 2020.
- AZEVEDO, Aline Damasceno, et al. Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. *Floresta*, 2018, 48.2: 183-194.
- CASTRO, Rodrigo Baia, et al. Identification of priority areas for landscape connectivity maintenance in the Xingu Area of Endemism in Brazilian Amazonia. *Acta Amazonica*, 2020, 50: 68-79.
- CHAZDON, et al. Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. *Science* 320, 1458. 2008.
- CHAZDON, et al. The Potential for Species Conservation in Tropical Secondary Forests. *Conservation Biology*. V. 23, no. 6, 1406-1417. 2009.
- CHEN, Y. et al. Landscape connectivity and human well-being: A review. *Ecosystem Services*, v. 31, p. 85-94, 2018.
- COELHO, Nayra Rosa, et al. Panorama das iniciativas de pagamento por serviços ambientais hídricos no Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 2021.
- DE ASSIS, Júlia Camara; FURLAN, Sueli Angelo. O contexto da paisagem e a influência das estradas no sistema de áreas protegidas do contínuo da cantareira. I Simpósio Interdisciplinar de Ciência Ambiental. 2015. p. 256.
- DE BOER, D. H. Hierarchies and spatial scale in process geomorphology: a review. *Geomorphology*, 4(5), 303-318, 1992.
- DIB, Viviane, et al. Drivers of change in biodiversity and ecosystem services in the Cantareira System Protected Area: A prospective analysis of the implementation of public policies. *Biota Neotropica*, 2020, 20.
- ENGLUND, Oskar, et al. A new high-resolution nationwide aboveground carbon map for Brazil. *Geo: geography and environment*, 2017, 4.2: e00045.
- FUNDAÇÃO FLORESTAL, Agosto de 2016. Plano de Manejo Parque Estadual da Serra do Mar. São Paulo, 2008.
- GRANDE, Thallita O.; AGUIAR, Ludmilla MS; MACHADO, Ricardo B. Heating a biodiversity hotspot: connectivity is more important than remaining habitat. *Landscape Ecology*, 2020, 1-19.

- GRAY, Erin, et al. Green-Gray Assessment: how to assess the costs and benefits of green infrastructure for water supply systems. 2019.
- HONDA, Eliane Akiko; DURIGAN, Giselda. A restauração de ecossistemas e a produção de água. *Hoehnea*, 2017, 44: 315-327.
- LENOIR, J., DECOCQ, G., SPICHER, F., GALLET MORON, E., BURIDANT, J., & CLOSSET JALAS, J. Hemerokrit ja hemerobit. *Luonnon Tutkija*, n. 57: p. 12-16, 1953.
- JÚNIOR, José Fernando Pinese; RODRIGUES, Silvio Carlos. O método de análise hierárquica–AHP–como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG). *Revista do Departamento de Geografia*, 2012, 23: 4-26.
- LENTI, Felipe Eduardo Brandão. Estimativa de emissões evitadas e remoções de dióxido de carbono (CO₂) em projetos apoiados pelo Programa de Pequenos Projetos Ecosociais (PPP–ECOS) no Arco do Desmatamento. Instituto Sociedade, População e Natureza (ISPN), Brasília, 2017.
- MAGNAGO, Luiz Fernando S., et al. Functional attributes change but functional richness is unchanged after fragmentation of Brazilian Atlantic forests. *Journal of ecology*, 2014, 102.2: 475-485.
- METZGER, Jean Paul. O Código Florestal tem base científica. *Natureza & Conservação*, 2010, 8.1: 1-5.
- NICOD, J.; J. TRICART, La Terre, planète vivante. *Méditerranée*, (1975), 20(1), 93-93. Paese, A.; Uezu, A.; Lorini, M.L.; Cunha, A., 2012. *Conservação da biodiversidade com SIG*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. v. 1. 240p.
- PIMENTA, Lianne Borja, et al. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. *Interações (Campo Grande)*, 2019, 20: 407-420.
- QI, Ke; FAN, Zhengqiu; XIE, Yujing. The influences of habitat proportion and patch-level structural factors in the spatial habitat importance ranking for connectivity and implications for habitat conservation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 64: 127239.
- RODRIGUES, C.; VILLELA, F. N. J. Disponibilidade e escassez de água na Grande São Paulo: elementos-chave para compreender a origem da atual crise de abastecimento. *Geosp – Espaço e Tempo*, v. 19, n. 3, p. 399-421, mês. 2016. ISSN 2179-0892.
- SAATY, Thomas L. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In: *Multiple criteria decision analysis*. Springer, New York, NY, 2016. p. 363-419.

- SANTOS, T. G.; VENTORINI, S. Mapeamento de áreas suscetíveis aos desastres humanos de natureza na bacia do Córrego do Lenheiro, Minas Gerais, Brasil. *Revista Venezolana de Geografia*, Mérida, v. 59, n. 1, p. 162- 181, jun. 2018.
- SANTOS, Carla ZA, et al. Multi-criteria analysis for selection of priority management programs for the Japarutuba River Basin, SE, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2021, 25: 717-724.
- SCHUMM, S. A. *To Interpret The Earth: Ten Ways To Be Wrong*. Cambridge University Press, 1991, 133p.
- SILVA, CA de; NUNES, Fábio de Paiva. Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, INPE, 2009, 5435-5442.
- SILVA, Alessandra Leite da, et al. Classificação de fragmentos florestais urbanos com base em métricas da paisagem. *Ciência Florestal*, 2019, 29: 1254-1269.
- SILVA, Alessandra Leite da; RIBEIRO, Admilson Írio; LONGO, Regina Márcia. Environmental Quality of forest remnants in the Capivari River Sub-basin (Campinas-Sao Paulo-Brazil). *Sociedade & Natureza*, 2021, 33.
- STRASSBURG, Bernardo. Identificando áreas prioritárias para Restauração no Bioma Amazônia - IIS. *Amazônia 2030*. 2022.
- SUKOPP, H.. Wandel von Flora und Vegetation in Mitteleuropa unter dem Einfluss des Menschen. *Berichte über Landwirtschaft*, Bd. 50/H.1: 112-139, 1972.
- TRICART, J. *O Campo na Dialética da Geografia. Reflexões sobre a Geografia*. 1980.
- VELOSO, H. P.; Rangel-Filho, A. L. R. & Lima, J. C. A. Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1991.
- UEZU, A., et al. Atlas dos serviços ambientais do sistema Cantareira. Instituto de Pesquisas Ecológicas (IPÊ), Nazaré Paulista, 2017.
- WILCOVE, David S., et al. Habitat fragmentation in the temperate zone. *Conservation biology*, 1986, 6: 237-256.
- WHATELY, Marussia, et al. *Serviços ambientais: conhecer, valorizar e cuidar: subsídios para a proteção dos mananciais de São Paulo*. Instituto Socioambiental, São Paulo, 2008.
- ZACHARIAS, Andrea, et al. A cartografia de síntese e as estruturas verticais e horizontais da paisagem em ambientes urbanos suscetíveis à inundação. *Revista do Departamento de Geografia*, 2021.