



Modelagem espacial das áreas campestres e montanas da Mata Atlântica: hotspots intrabioma em meio às florestas

Spatial modeling of the grassland and montane areas of the Atlantic Forest: Intrabiome hotspots amid the forests

Lucas Gonçalves da Silva^{1,2*}, Taís Rizzo Moreira¹, Paulo M. Gonella¹, Dayvid R. Couto³, Thais Helena Condez¹, Flavia Guimarães Chaves¹

¹ Instituto Nacional da Mata Atlântica – INMA, Av. Jose Ruschi 4, Santa Teresa, Espírito Santo, Brasil, 29650-000.

² Centro de Pesquisas em Biodiversidade e Mudanças Climáticas – CBioClima UNESP, Avenida 24A 1515, Rio Claro, São Paulo, Brasil, 13506-900.

³ Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória, Espírito Santo, 29075-910.

LGS - orcid.org/0000-0002-7993-9015

TRM - orcid.org/0000-0001-5536-6286

PMG - orcid.org/0000-0001-8332-5326

DRC - orcid.org/0000-0002-9563-8001

THC - orcid.org/0000-0003-0736-4651

FGC - orcid.org/0000-0001-7093-9011

*Autor correspondente: Lucas Gonçalves da Silva – lucas.goncalves@inma.gov.br

Recebido: 09/10/2025

Aceito: 08/12/2025

Resumo

A Mata Atlântica é um dos domínios naturais mais diversos e ameaçados do planeta, abrigando diferentes formações vegetacionais e ecossistemas pouco explorados, entre as quais áreas abertas em ambientes de altitude se destacam pela alta biodiversidade e expressivo endemismo. Localizados principalmente nos topos de montanhas e planaltos, campos de altitude, campos rupestres e *inselbergs* isolados, desempenham papéis ecológicos fundamentais, mas que devido ao conhecimento incipiente, permanecem como ecossistemas sub-representados em estratégias de conservação. Este estudo teve como objetivo mapear, com alta resolução e precisão, a distribuição dessas áreas campestres e montanas da Mata Atlântica, integrando informações espectrais, topográficas satelitais em um modelo supervisionado baseado em rede neural convolucional. O modelo apresentou desempenho robusto (precisão >95%), permitindo uma delimitação precisa dessas formações e a identificação de áreas potencialmente subestimadas em mapeamentos oficiais. As áreas campestres e montanas da Mata Atlântica abrigam comunidades especializadas de plantas, aves, mamíferos, anfíbios e répteis, cujas distribuições refletem a influência de gradientes altitudinais, isolamentos geográficos e estabilidade paleoclimática em ambientes geralmente empobrecidos em nutrientes em comparação com matrizes florestais adjacentes. Esses ecossistemas funcionam como refúgios evolutivos, que enfrentam ameaças crescentes devido à conversão de habitats naturais e efeitos decorrentes das mudanças climáticas. Os resultados do mapeamento identificaram a ocorrência e a distribuição dos campos de altitude, campos rupestres e *inselbergs* da Mata Atlântica, evidenciando prioridades de conservação, e fornecendo subsídios técnicos e científicos para o aprimoramento de políticas públicas voltadas à proposição e ampliação de áreas protegidas, restauração ecológica e implementação de corredores. A abordagem metodológica e os produtos gerados oferecem uma base estratégica para o planejamento territorial e o enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade brasileira.

Palavras-chave: Campos de altitude, Campos rupestres, *Inselbergs*, Modelagem ecológica, Planejamento da conservação.

Abstract

The Atlantic Forest is one of the most diverse and threatened natural domains on the planet, encompassing a variety of vegetation formations and poorly explored ecosystems. Among these, open areas in high-altitude environments stand out for their high biodiversity and remarkable endemism. Located mainly on mountain summits and plateaus, isolated highland grasslands, campos rupestres and inselbergs play essential ecological roles but remain underrepresented in conservation strategies due to limited scientific knowledge. This study aimed to map, with high resolution and accuracy, the distribution of these grassland and high-montane areas within the Atlantic Forest by integrating spectral and satellite-derived topographic information into a supervised model based on a convolutional neural network. The model exhibited robust performance (accuracy >95%), enabling precise delineation of these formations and the identification of areas potentially underestimated in official land-cover mappings. The grassland and high-montane areas of the Atlantic Forest harbor specialized communities of plants, birds, mammals, amphibians, and reptiles, whose distributions reflect the influence of elevational gradients, geographic isolation, and paleoclimatic stability in environments generally nutrient-poor compared to adjacent forest matrices. These ecosystems function as evolutionary refugia, yet they face increasing threats from the conversion of natural habitats and the effects of climate change. The mapping results identified the occurrence and distribution of highland grasslands, campos rupestres and inselbergs within the Atlantic Forest, highlighting conservation priorities and providing scientific and technical support for the improvement of public policies aimed at establishing and expanding protected areas, promoting ecological restoration, and implementing habitat corridors. The methodological approach and resulting products offer a strategic basis for territorial planning and for addressing the impacts of climate change on Brazilian biodiversity.

Keywords: highland grasslands, rupestres fields, inselbergs, ecological modeling, conservation planning.

INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é reconhecida como um dos hotspots globais de biodiversidade (Critical Ecosystem Partnership Fund [CEPF], 2023; Myers et al., 2000), caracterizada por uma complexa heterogeneidade ambiental que combina florestas ombrófilas e estacionais com formações campestres e savânicas, especialmente em áreas de altitude e topos de montanhas (Costa et al., 2023; Pinto et al., 2006; Vancine et al., 2024). Entre essas formações, destacam-se os campos de altitude, os campos rupestres e os

inselbergs de granito/gnaiss, ecossistemas que apresentam elevada diversidade biológica e níveis significativos de endemismos, sendo considerados pontos chave para espécies raras e ameaçadas (Alves et al., 2014; Covre et al., 2025; Oswald et al., 2025; Safford, 2007; Silveira et al., 2016; Tabarelli et al., 2006; Vasconcelos, 2011). Esses ecossistemas desempenham funções ecológicas essenciais, como regulação hídrica, manutenção de microclimas locais, polinização, dispersão de sementes e sequestro de carbono, contribuindo diretamente para a resiliência ambiental e a estabilidade ecológica das regiões

adjacentes (Fernandes et al., 2020; Francisco et al., 2025; Tabarelli et al., 2006).

Estudos recentes demonstram que a diversidade biológica desses ambientes não é distribuída de forma homogênea, sendo fortemente influenciada por gradientes altitudinais, climáticos e históricos (Alves-Ferreira et al., 2025; Carnaval et al., 2009; Costa et al., 2023), seguindo a chamada teoria OCBIL (Hopper, 2009). Espécies de fauna e flora frequentemente exibem padrões de distribuição altamente restritos em microhabitats específicos, refletindo adaptações evolutivas a condições ambientais particulares, como resposta às variações de temperatura, umidade e radiação solar (Alves-Ferreira et al., 2025; Kasper et al., 2024). Modelagens ecológicas indicam que as mudanças climáticas podem alterar significativamente esses padrões, provocando deslocamentos altitudinais de espécies, redução de habitats adequados e aumento do risco de extinção local, sobretudo para espécies endêmicas de distribuição limitada (Alves-Ferreira et al., 2025; Chaves et al., 2025), fazendo com que os campos da Mata Atlântica possam potencialmente figurar como os ecossistemas mais ameaçados do Brasil.

A conservação dessas áreas é imperativa não apenas por sua riqueza biológica singular e espécies ameaçadas e endêmicas, mas também pelo papel que desempenham em processos ecológicos regionais e globais de mitigação de mudanças climáticas e a manutenção da conectividade ecológica (Dinerstein et al., 2024; Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima [MMA], 2025a; Vancine et al., 2024). Entretanto, a degradação ambiental e as pressões antrópicas, como expansão urbana, mineração e atividades agrícolas, comprometem a integridade e a funcionalidade desses ecossistemas, exigindo estratégias de manejo e conservação (MMA, 2025b; Vancine et al., 2024).

No contexto das mudanças climáticas, a conservação das áreas campestres do bioma

requer medidas adaptativas, incluindo a criação de corredores ecológicos, restauração de habitats degradados, ampliação de áreas protegidas e monitoramento contínuo de espécies vulneráveis (Fernandes et al., 2020; Metzger et al., 2009; Tabarelli et al., 2006). Estratégias baseadas em modelagem de nicho ecológico podem identificar refúgios climáticos potenciais, locais que devem ser prioritariamente conservados devido à sua capacidade de abrigar as espécies mesmo sob cenários de aumento da temperatura e de alterações pluviométricas (Alves-Ferreira et al., 2025; Lemes et al., 2014; Malecha et al., 2025). A integração dessas análises com medidas de políticas públicas e manejo territorial é essencial para reduzir a vulnerabilidade dessas áreas campestres e garantir a preservação de serviços ecossistêmicos críticos, como a regulação hídrica, o sequestro de carbono e a manutenção da biodiversidade endêmica (Fernandes et al., 2020; Ribeiro et al., 2009).

Compreender os padrões de diversidade, distribuição e interações ecológicas nas áreas campestres e montanas da Mata Atlântica torna-se fundamental para o planejamento de ações de conservação eficazes. Estudos integrando modelos ecológicos, levantamento de espécies endêmicas e análises ecológicas e evolutivas em nível de paisagem oferecem subsídios importantes para a mitigação dos impactos das mudanças ambientais e para a preservação de um dos biomas mais ameaçados do planeta, garantindo não apenas a conservação da biodiversidade, mas também a provisão de serviços ecossistêmicos essenciais à sociedade (Alves-Ferreira et al., 2025; Oswald et al., 2025; Ribeiro et al., 2009).

Diante da relevância ecológica e da crescente ameaça das mudanças climáticas sobre os ecossistemas campestres da Mata Atlântica, o presente estudo teve como objetivo elaborar um mapa preciso e atualizado dos campos de altitude, campos rupestres e *inselbergs*, possibilitando a exploração aprofundada de questões

biogeográficas, dados sobre a biodiversidade associada e o impacto direto das atividades antrópicas e mudanças climáticas nessas formações. Ao considerar dados conhecidos sobre a distribuição espacial de espécies endêmicas e os padrões de diversidade ecológica, o estudo busca fornecer uma ferramenta robusta e integrada para apoiar estratégias de conservação e planejamento ambiental e territorial, contribuindo para a proteção de habitats ameaçados e para o manejo adaptativo frente às transformações climáticas projetadas.

MATERIAL E MÉTODOS

A Mata Atlântica apresenta uma ampla diversidade de fitofisionomias, conforme previsto no art. 2º da Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Entre elas, destacam-se as formações florestais nativas e ecossistemas associados: Floresta Ombrófila Densa; Floresta Ombrófila Mista (também denominada de Mata de Araucárias); Floresta Ombrófila Aberta; Floresta Estacional Semidecidual; e Floresta Estacional Decidual, bem como os manguezais, as vegetações de restingas, campos de altitude, brejos interioranos e enclaves florestais do Nordeste. Essas fitofisionomias foram delimitadas em escala ampla. No entanto, observa-se, especificamente em relação aos campos de altitude, a ocorrência de inconsistências de classificação quando comparadas aos pontos geográficos de validação obtidos em campo. Tal discrepância decorre da escala utilizada para a delimitação dessas fitofisionomias e das próprias características que a tornam suscetível a confusões com outras formações, quando analisada em escalas menos detalhadas.

Buscou-se identificar a fitofisionomia de áreas campestres de altitude e formações montanas associadas (incluindo campos rupestres quartzísticos e ferruginosos, *inselbergs* e brejos) dentro das delimitações do Bioma Mata Atlântica,

conforme estabelecido na Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Para isso, foram utilizadas coordenadas geográficas coletadas in loco ao longo do bioma, de forma oportunística em expedições de pesquisas relacionadas com a flora e a fauna, realizadas entre os anos de 2018 e 2025. Complementarmente, empregaram-se os vetores de fitofisionomias disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (mapas em escala 1:250.000) e pela base Terrestrial Ecoregions of the World (WWF).

A metodologia consistiu na seleção de duas classes de interesse: (1) compreendendo campos de altitude, campos rupestres, *inselbergs* e brejos alti-montanos, e (2) de não-campos, a partir de geometrias vetoriais previamente definidas no Google Earth Engine (GEE). Com base nos dados coletados em campo, e utilizando como apoio modelos digitais de elevação e ortofotos aéreas disponibilizadas pelo Google, foram geradas, em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), amostras representativas de campos de altitude e formações associadas, bem como amostras de áreas identificadas como não pertencentes a essa fitofisionomia (outras formações vegetacionais, como florestas, restingas e manguezais). Essas amostras subsidiaram a modelagem da distribuição espacial dos campos de altitude em todo o domínio da Mata Atlântica. Em cada classe foram amostrados 500 pontos aleatórios, totalizando 1.000 amostras, com reamostragem aleatória.

Foi construído um banco de dados supervisionado no ambiente Google Earth Engine (GEE). Inicialmente, foram utilizadas duas classes de interesse, a partir de geometrias vetoriais previamente definidas. Dentro dessas áreas, foram gerados aleatoriamente 2.000 pontos para a classe 1 e 2.500 pontos para a classe 2. Como preditores espectrais, empregou-se a coleção Landsat 8 Nível 2 (Surface Reflectance), à qual foram aplicados procedimentos de correção radiométrica (escala e offset), bem como

máscaras de nuvens, sombras e saturação radiométrica. A partir do mosaico resultante (mediana anual), foram extraídas as bandas B2–B7 e calculados os seguintes índices espectrais: vegetação (NDVI), água (NDWI), solo exposto (BSI) e áreas urbanas (NDBI). Para incorporar variáveis auxiliares, adicionaram-se o modelo digital de elevação SRTM (ELEV) e duas bandas do produto de satellite embeddings (A16 e A57), referentes à mediana do período 2023–2024. As embeddings foram reamostradas por interpolação bilinear e reprojetaadas para o sistema de referência e a resolução (30 m) do Landsat.

Essas fontes compuseram uma pilha multibanda final contendo 13 variáveis (B2, B3, B4, B5, B6, B7, ELEV, A16, A57, NDVI, NDWI, BSI e NDBI). Os pontos amostrados receberam o rótulo binário landcover (1 = campos; 0 = não-campos), e os valores espectrais correspondentes foram extraídos por meio da função `sampleRegions`. Posteriormente, os dados foram particionados em conjuntos de treinamento (70%) e teste (30%) mediante coluna aleatória estratificada. Por fim, as tabelas resultantes foram exportadas em formato CSV para armazenamento em nuvem, contendo exclusivamente as variáveis preditoras e o rótulo de classe, a fim de subsidiar etapas posteriores de modelagem e validação estatística.

Os dados de treino e teste, previamente exportados do Google Earth Engine (GEE) em formato CSV, foram lidos no ambiente Colab. As variáveis preditoras (B2–B7, ELEV, A16, A57, NDVI, NDWI, BSI e NDBI) e o rótulo binário (landcover) foram convertidos em tensores PyTorch e organizados em batches via `DataLoader`. Em seguida, definiu-se uma rede neural convolucional simples com duas camadas, empregando normalização em lote, dropout e função de perda `CrossEntropyLoss` com label smoothing. O modelo foi otimizado com AdamW durante 200 épocas.

A avaliação utilizou o conjunto de teste reservado (30%), com cálculo da perda e da precisão. Uma vez treinado, o modelo foi salvo

em formato compatível com o TorchServe, acompanhado de um handler personalizado para retornar a classe de maior probabilidade. Esse artefato foi empacotado e armazenado em um bucket no Google Cloud Storage, sendo então registrado no Vertex AI Model Registry e implantado em um endpoint dedicado para predições online.

No GEE, a conexão ao modelo hospedado foi realizada por meio da classe `ee.Model.fromVertexAi`, com o formato de entrada definido como `ND_ARRAYS`. Um mosaico Landsat, complementado com as variáveis auxiliares (SRTM e embeddings), foi preparado de forma consistente com o processo de treinamento. Esse conjunto de bandas foi submetido ao modelo implantado, resultando em um mapa de probabilidade e classificação das classes de interesse. Os resultados foram visualizados interativamente no GEE e posteriormente recortados à área de interesse definida por uma geometria vetorial (asset MA) referente à delimitação legal da Mata Atlântica. Finalmente, o produto classificado foi exportado em formato raster para o Google Drive, e validado com pontos de controle obtidos em campo (Figuras 1 e 2, respectivamente).

RESULTADOS

O modelo apresentou alto desempenho tanto nos dados de treinamento quanto nos de teste, indicando boa capacidade de generalização (Figura 1). Nos dados de treinamento, obteve precisão de 96,36%, com precisão, revocação e F1-score macro superiores a 96%. O índice mIoU alcançou 0,929, evidenciando consistência na classificação. Para as classes individualmente, a IoU foi de 0,9357 (landcover classe 0) e 0,9225 (landcover classe 1). A matriz de confusão mostrou 1.673 acertos para a classe 0 e 1.368 para a classe 1, com poucos erros de classificação (91 falsos positivos e 24 falsos negativos). Nos dados de teste, o desempenho manteve-se elevado, com

precisão de 95,88%, precisão, revocação e F1-score macro próximos de 96% e mIoU de 0,920. A IoU por classe foi de 0,9269 para a classe 0 e 0,9139 para a classe 1. A matriz de confusão

indicou 697 acertos para a classe 0 e 584 para a classe 1, com apenas 38 falsos positivos e 17 falsos negativos.

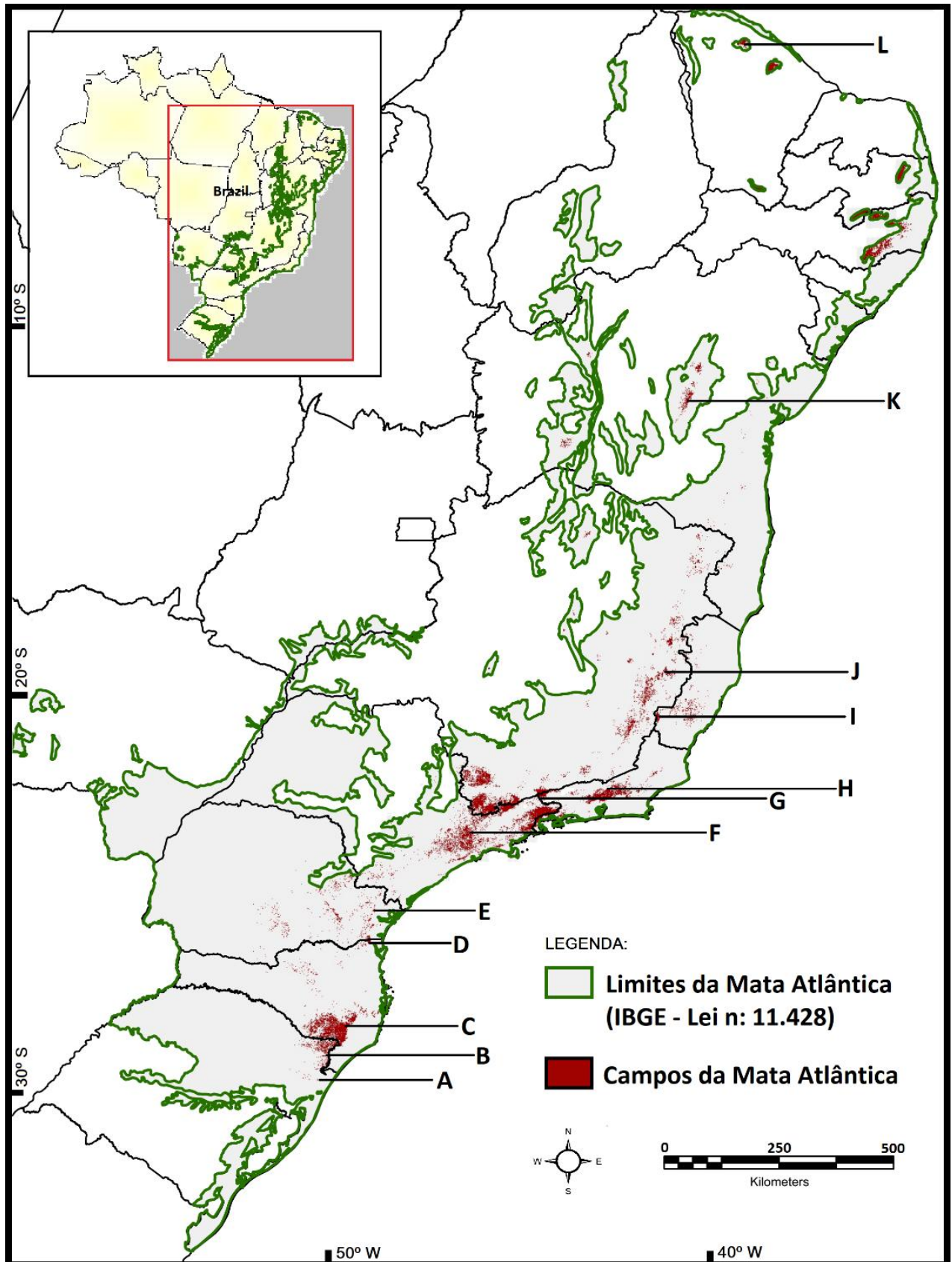


Figura 1. Novo mapa das regiões campestres 300m pixel da Mata Atlântica, e as áreas amostradas como controle correspondentes às localidades e fotos da Figura 2.

O relatório de classificação apresentou precisão de 0,99, revocação de 0,95 e F1-score de 0,97 para a landcover classe 0 e precisão de 0,94, revocação de 0,98 e F1-score de 0,96 para a landcover classe 1. O acerto global foi de 96%, com médias macro e ponderada igualmente em torno de 0,96, fazendo com que todos os pontos de controle utilizados (Figura 2) fossem discriminados no mapa como classes de interesse do modelo. O mapa final em formato raster 300m pixel da Figura 1 ficará disponibilizado em repositório público do Instituto Nacional da Mata Atlântica (INMA).

Em relação ao limítrofe altitudinal dos diferentes pontos de controle, foi observado um claro efeito do gradiente latitudinal sobre a formação de áreas campestres e alto-montanas do bioma. O ponto de controle mais ao Sul, localizado na Reserva Biológica da Serra Geral no Rio Grande do Sul (Figuras 1 e 2, letra A), tem as formações campestres de mais baixa altitude da Mata Atlântica, ocorrendo a partir de 788m. Nas regiões mais centrais do bioma, como, por exemplo, o Parque Nacional da Serra dos Órgãos, Parque Nacional do Caparaó e a Serra do Padre Ângelo (Figuras 1 e 2, letras H, I e J, respectivamente), as formações campestres ocorrem somente acima dos 1200m. Já no extremo Norte da Mata Atlântica, a Serra do Baturité no Ceará (Figuras 1 e 2, letra L) apresenta formações alto-montanas a partir dos 935m de altitude.

DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstram a eficácia do modelo de classificação supervisionada em discriminar as áreas campestres e montanas da Mata Atlântica com alto acerto, fornecendo uma base espacial robusta para análises biogeográficas e ecológicas. A delimitação precisa dessas formações é

particularmente relevante diante da complexidade estrutural e florística do bioma, no qual formações campestres montanas e formações savânicas frequentemente se interdigitam com florestas ombrófilas e estacionais (Costa et al., 2023; Pinto et al., 2006). Essa heterogeneidade ambiental e a longa história evolutiva dessas formações é fator responsável pela expressiva diversidade biológica e pelos altos níveis de endemismo observados entre diferentes grupos taxonômicos nessas áreas (Alves-Ferreira et al., 2025; Hopper, 2009).

Mapeamentos anteriores dessas áreas campestres e montanas da Mata Atlântica não se mostraram eficientes na predição espacial realística dessas áreas. Arquivos disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e pela base Terrestrial Ecoregions of the World (WWF) são insuficientes para discriminar os campos do bioma. Nossos pontos de validação da Figura 2, quase na sua totalidade, não correspondem às áreas de interesse. Isso é problemático na identificação de áreas de endemismos com diversidade única, bastante distintas dos ecossistemas florestais da Mata Atlântica. Conformações de vegetação campestre por vezes são invisíveis no IUCN Global Ecosystem Typology, resultando na dificuldade de identificação e monitoramento de áreas chave para a biodiversidade e a resiliência climática (Keith et al., 2021). Nesse cenário, os resultados são de crucial importância para holofotes de conservação das áreas campestres e montanas do bioma.

A biodiversidade dessas áreas campestres e montanas é um fator de especial interesse. Entre as plantas, os campos de altitude, campos rupestres e inselbergs abrigam uma flora altamente especializada, apresentando adaptações fisiológicas e morfológicas que permitem tolerar condições extremas de radiação solar, baixas temperaturas, incidência de fortes ventos e baixa disponibilidade de nutrientes (Fernandes et al., 2020; Pizzardo et al., 2024). Muitas dessas

espécies são endêmicas de topos de montanhas isoladas, configurando padrões de distribuição disjuntos típicos de “sky islands”, que favorecem a especiação alopátrica e a diversificação genética (Barbará et al., 2009; Couto et al., 2022). Essa estrutura em mosaico também é observada na fauna, especialmente em aves e mamíferos de pequeno porte, cujas distribuições refletem tanto a história geológica dos maciços quanto os gradientes climáticos atuais. Mamíferos endêmicos de campos rupestres demonstram padrões de distribuição restritos, muitas vezes desconectados de populações florestais (Costa et al., 2000). Essa segregação espacial evidencia o papel dos campos como reservatórios evolutivos e centros de endemismo intra-bioma.

Os campos e formações montanas da Mata Atlântica revelam um mosaico singular de endemismos e padrões biogeográficos que refletem a complexa história evolutiva e ambiental dessas formações. Distribuídas em enclaves altitudinais e formações abertas inseridas na floresta, essas áreas abrigam espécies adaptadas a condições ecológicas específicas e muitas vezes geograficamente restritas, o que resulta em altos níveis de endemismo (Costa et al., 2023; Freitas et al., 2023). Alguns grupos como mamíferos, aves, répteis, anfíbios e peixes exibem distribuições disjuntas e linhagens evolutivamente distintas, sugerindo eventos históricos de isolamento e reconexão entre populações durante oscilações climáticas do Pleistoceno (Costa et al., 2000; Covre et al., 2022; De Vivo & Carmignotto, 2004; Freitas et al., 2023; Kasper et al., 2024; Oswald et al., 2025; Peres et al., 2020; Prado & Gibbs, 1993; Rivadeneira et al., 2025). Além disso, a interface entre campos e florestas cria zonas de transição que favorecem tanto a coexistência de espécies florestais quanto campestres, reforçando o papel desses ambientes como refúgios e corredores biogeográficos (Lucrezia et al., 2025; Oliveira-Filho & Fontes, 2000; Rapini et al., 2008). Esses táxons apresentam populações vulneráveis às mudanças microclimáticas, o que reforça a necessidade da proteção de áreas de refúgios

altitudinais para a manutenção da diversidade genética e a sua conservação (Carnaval et al., 2009; Grelle et al., 2021; Pupin et al., 2025).

O padrão encontrado pelo mapeamento com definição espacial de áreas campestres, afloramentos rochosos, *inselbergs* e brejos de altitude dentro da extensão da Mata Atlântica corrobora a hipótese de que essas áreas funcionam como sistemas altamente especializados, nos quais a diversidade beta e o endemismo são controlados por gradientes altitudinais, história paleoclimática e isolamento geográfico (Carnaval et al., 2009; Covre et al., 2025). Essa configuração torna essas áreas particularmente vulneráveis às mudanças climáticas, que podem provocar o colapso de populações de distribuição restrita e limitar a capacidade de dispersão para novos habitats adequados (Dinerstein et al., 2024). Modelos preditivos sugerem que, sob cenários de aumento de temperatura e redução da umidade, espécies endêmicas de topo de montanha enfrentarão uma “armadilha altitudinal”, com ausência de habitats mais frios para migração e dispersão (Alves-Ferreira et al., 2025; Robinson et al., 2018).

Os mapas gerados neste estudo representam uma ferramenta estratégica para identificar potenciais refúgios climáticos e áreas prioritárias de conservação, com potenciais implicações para o mapa da IUCN Red List of Ecosystems (Keith et al., 2024). A integração de dados espectrais e topográficos oriundos de sensores remotos permitiu a delimitação mais robusta dos campos e formações associadas, superando as diversas limitações das bases cartográficas convencionais (e.g. IBGE). A precisão alcançada (>95%) reforça a confiabilidade do método para subsidiar análises de mapeamento espacial, conectividade e modelagens ecológicas futuras. A aplicação desses resultados pode orientar de forma assertiva a expansão de unidades de conservação, a restauração de ecossistemas degradados e a criação de corredores altitudinais, fundamentais

para a migração de espécies sensíveis às variações climáticas (Fernandes et al., 2020; Metzger et al., 2009).

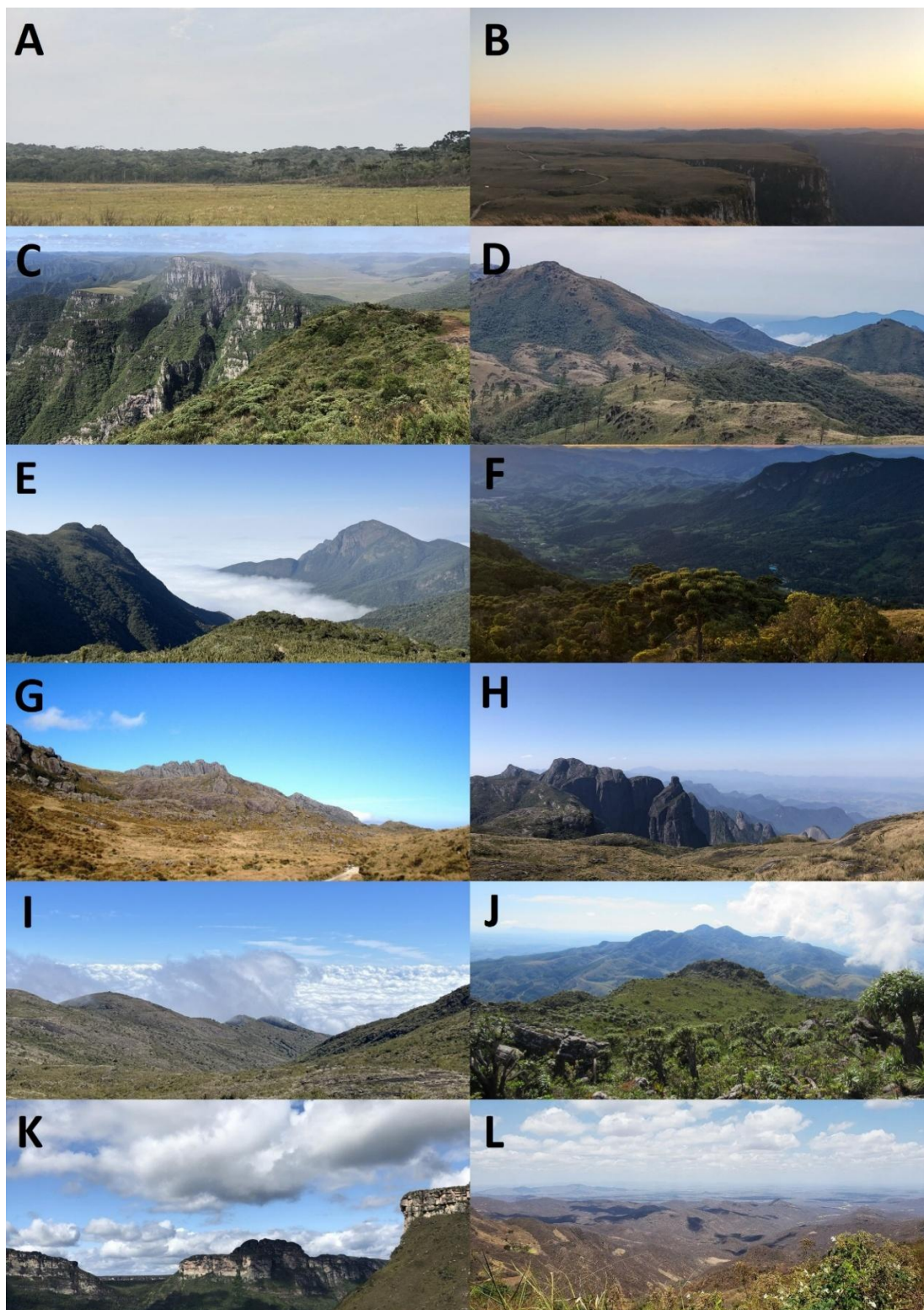


Figura 2. Regiões amostradas como controle de campos da Mata Atlântica, correspondentes às localidades mostradas no mapa da Figura 1: (A) Reserva Biológica da Serra Geral (RS); (B) Parque Nacional da Serra Geral (RS); (C) Parque Nacional de São Joaquim (SC); (D) Campos de Quiriri (SC); (E) Parque Estadual do Pico Paraná (PR); (F) Parque Estadual de Campos do Jordão (SP); (G) Parque Nacional do Itatiaia (RJ); (H) Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ); (I) Parque Nacional do Caparaó (MG/ES); (J) Serra do Padre Ângelo (MG); (K) Parque Nacional da Chapada Diamantina (BA), e; (L) Serra do Baturité (CE). Fotos: Lucas G. da Silva e Paulo M. Gonella.

Apesar do elevado desempenho obtido pelo modelo, algumas limitações metodológicas devem ser consideradas. É possível que parte das áreas classificadas apresentem erros de omissão e de comissão. Tais discrepâncias decorrem, em grande parte, das restrições impostas pela resolução espacial das imagens utilizadas (Landsat 8, 30 m) e pela escala cartográfica dos vetores de referência (1:250.000), que podem não capturar as variações microtopográficas e estruturais típicas dessa formação vegetal (Ferla et al., 2025). Ademais, a similaridade espectral entre áreas campestres e outras fitofisionomias abertas, como áreas de vegetação secundária em estágios iniciais de regeneração, contribui para eventuais ambiguidades na classificação supervisionada (Carvalho et al., 2010). Outro fator potencialmente relevante é o desbalanceamento amostral e a distribuição espacial heterogênea dos pontos de treinamento, que podem reduzir a capacidade do modelo em generalizar padrões espaciais extremamente complexos (Maxwell et al., 2018). Dessa forma, recomenda-se, para estudos futuros, a integração de dados de maior resolução espacial (<300m pixel) e espectral (<30m pixel), bem como o aprimoramento das estratégias de amostragem e validação cruzada, de modo a reduzir potenciais incertezas e aprimorar a precisão temática do mapeamento.

Considerando o alto grau de endemismo e a singularidade biogeográfica das áreas campestres e montanas da Mata Atlântica, estratégias de conservação devem priorizar uma abordagem integrada que contemple tanto a representatividade ecológica quanto a funcionalidade das paisagens (Tabarelli et al., 2006). O planejamento baseado em evidências espaciais, como o apresentado neste trabalho, permite avançar no planejamento e na mitigação dos impactos das mudanças climáticas e no fortalecimento de políticas públicas voltadas à proteção dos ecossistemas campestres, um dos

componentes mais ameaçados e menos conhecidos do bioma.

CONCLUSÕES

O presente estudo evidenciou a alta precisão e aplicabilidade de técnicas avançadas de sensoriamento remoto e aprendizado profundo na delimitação das áreas campestres e montanas da Mata Atlântica, proporcionando uma representação espacial mais acurada dessas formações ecologicamente singulares. A partir dessa base, foi possível correlacionar áreas campestres delimitadas pela modelagem espacial com hotspots intrabioma de biodiversidade, abrigando elevados níveis de endemismo entre plantas, aves, mamíferos, anfíbios e répteis, cujas distribuições refletem padrões biogeográficos moldados por gradientes altitudinais, isolamento geográfico e estabilidade paleoclimática. Esses ecossistemas, entretanto, figuram entre os mais vulneráveis às mudanças climáticas dadas as restrições espaciais. Assim, a cartografia refinada apresentada neste trabalho representa um instrumento estratégico para o planejamento de ações de conservação e manejo adaptativo, subsidiando a identificação de refúgios climáticos e de áreas prioritárias para proteção e restauração. A integração de dados da modelagem com a biogeografia da biodiversidade dessas áreas revela-se essencial para orientar políticas públicas e esforços científicos voltados à preservação das áreas campestres e montanas da Mata Atlântica, que são formações críticas para a manutenção de diversidade biológica, de serviços ecossistêmicos e da resiliência ambiental frente às transformações globais em curso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores Rafaela Forzza, Jorge Luiz do Nascimento, Mauro Galetti, Pedro Lage Viana, Talitha Mayumi Francisco, Juliana Silveira e Leopoldo Cavaleri pelas discussões pertinentes na

composição do artigo. Agradecimentos ao Instituto Nacional da Mata Atlântica (INMA) e Centro de Pesquisas em Biodiversidade e Mudanças Climáticas (CBioClima) pelo apoio científico. LGS agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq Processo 169463/2023-0) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP Processo 2021/10639-5) pelo apoio financeiro. DRC agradece à Fundação Espírito-Santense de Tecnologia (FEST) pela concessão da bolsa de pós-doutorado (nº 1726/2025) vinculada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

ASPECTOS ÉTICOS E LEGAIS

Os autores declaram ausência de conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- Alves, R. J. V., Silva, N. G., Oliveira, J. A., & Medeiros, D. (2014). Circumscribing campo rupestre – megadiverse Brazilian rocky montane savanas. *Brazilian Journal of Biology*, 74(2), 355–362. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.23212>
- Alves-Ferreira, G., Vancine, M. H., Mota, F. M. M., Bello, C., Sobral-Souza, T., Percequillo, A. R., Lacher, T. E., Jr., Galetti, M., & Bovendorp, R. S. (2025). From hot to cold spots: Climate change is projected to modify diversity patterns of small mammals in a biodiversity hotspot. *Diversity and Distributions*, 31, e70026. <https://doi.org/10.1111/ddi.70026>
- Barbará, T., Martinelli, G., Palma-Silva, C., Fay, M. F., Mayo, S., & Lexer, C. (2009). Genetic relationships and variation in reproductive strategies in four closely related bromeliads adapted to neotropical “inselbergs”: *Alcantarea glazouana*, *A. regina*, *A. geniculata* and *A. imperialis* (Bromeliaceae). *Annals of Botany*, 103(1), 65–77. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn226>
- Carnaval, A. C., Hickerson, M. J., Haddad, C. F. B., Rodrigues, M. T., & Moritz, C. (2009). Stability predicts genetic diversity in the Brazilian Atlantic Forest hotspot. *Science*, 323(5915), 785–789. <https://doi.org/10.1126/science.1166955>
- Chaves, C. J. N., Carnaval, A. C., Leal, B. S. S., Santos, J. P., Monteiro, E. C. S., & Palma-Silva, C. (2025). Dispersal ability reduces thermal specialization and prevents climate-driven extinctions in a neotropical rainforest. *Global Change Biology*, 31, e70399. <https://doi.org/10.1111/gcb.70399>
- Carvalho, L. M. T. de, Rahman, M. M., Hay, G. J., & Yackel, J. (2010). Optical and SAR imagery for mapping vegetation gradients in Brazilian savannas: Synergy between pixel-based and object-based approaches. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(8).
- Costa, L. P., Leite, Y. L. R., da Fonseca, G. A. B., & da Fonseca, M. T. (2000). Biogeography of South American forest mammals: Endemism and diversity in the Atlantic Forest. *Biotropica*, 32(4B), 872–881.
- Costa, F. V., Viana-Júnior, A. B., Aguilar, R., Silveira, F. A. O., & Cornelissen, T. G. (2023). Biodiversity and elevation gradients: Insights on sampling biases across worldwide mountains. *Journal of Biogeography*, 50(11), 1879–1889. <https://doi.org/10.1111/jbi.14696>
- Couto, D. R., Kessous, I. M., Neves, B., Paixão-Souza, B., Faria, C. G., Barfuss, M. H. J., Salgueiro, F., Sá-Haiad, B. de, & Costa, A. F. (2022). Molecular phylogenetics and trait evolution in *Stigmatodon* (Bromeliaceae, Tillandsioideae), an endemic genus to Brazilian rocky outcrops. *Systematic Botany*, 47(2), 347–362. <https://doi.org/10.1600/036364422X16512564801696>
- Covre, A. C., Lourenço-de-Moraes, R., Siqueira Campos, F., & Benedito, E. (2022). Spatial relationships between fishes and amphibians: Implications for conservation planning in a Neotropical hotspot. *Environmental Management*, 70, 978–989. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01707-7>

- Covre, J. M. C., Couto, D. R., Francisco, T. M., Nascimento, M. T., & Dias, H. M. (2025). Woody vegetation in Atlantic Forest inselbergs: Floristic similarity, patterns of richness, pollination/dispersal syndromes, and influence of climatic variables. *Biota Neotropica*, 23(3), e20251796. <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2025-1796>
- Critical Ecosystem Partnership Fund. (2023). *Impact 2001–2023 & 2023 annual report*. <https://www.cepf.net>
- De Vivo, M., & Carmignotto, A. P. (2004). Holocene vegetation change and the mammal faunas of South America and Africa. *Journal of Biogeography*, 31(4), 943–957. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01068.x>
- Dinerstein, E., Joshi, A. R., Hahn, N. R., Lee, A. T. L., Vynne, C., Burkart, K., Asner, G. P., Beckham, C., Ceballos, G., Cuthbert, R., Dirzo, R., Fankem, O., Hertel, S., Li, B. V., Mellin, H., Pharand-Deschênes, F., Olson, D., Pandav, B., Peres, C. A., ... Zolli, A. (2024). Conservation imperatives: Securing the last unprotected terrestrial sites harboring irreplaceable biodiversity. *Frontiers in Science*, 2, 1349350. <https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1349350>
- Ferla, A. K., Kuplich, T. M., & Narvaes, I. da S. (2025). Utilização do classificador Random Forest para classificação do uso e cobertura da terra a partir de dados Sentinel-1 e 2 em região campestre no bioma Mata Atlântica. *Geografia Ensino & Pesquisa*, 29, e87967. <https://doi.org/10.5902/2236499487967>
- Fernandes, G. W., Arantes-Garcia, L., Barbosa, M., Barbosa, N. P. U., Batista, E. K. J., Beiroz, W., Resende, F. M., Abrão, A., Almeida, E. D., Alves, E., Alves, N. J., Angriano, P., Arista, M., Arroyo, J., Arture, A. J., Bahia, T. O., Braz, L., Brito, L., Callisto, M., ... Vieira, E. (2020). Biodiversity and ecosystem services in the campo rupestre: A road map for the sustainability of the hottest Brazilian biodiversity hotspot. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 18, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.pec.2020.10.003>
- Francisco, T. M., Couto, D. R., & Garbin, M. L. (2025). Network structure and species roles in epiphyte–phorophyte interactions on a Neotropical inselberg woody vegetation. *Forests*, 16(12), 1300. <https://doi.org/10.3390/f16081300>
- Freitas, M. A., Dubeux, J. M., Chaves, M. F., Fiorillo, B., Filho, G. A. P., Vieira, W. L. S., & Moura, J. B. de. (2023). Herpetofauna in three highland Atlantic Forest remnants in northeastern Brazil. *Herpetology Notes*, 16, 377–390.
- Grelle, C. E. V., Rajão, H., & Marques, M. C. M. (2021). The future of the Brazilian Atlantic Forest. In M. C. M. Marques & C. E. V. Grelle (Eds.), *The Atlantic Forest*. Springer Nature Switzerland.
- Hopper, S. D. (2009). OCBIL theory: Towards an integrated understanding of the evolution, ecology and conservation of biodiversity on old, climatically buffered, infertile landscapes. *Plant and Soil*, 322, 49–86. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0068-0>
- Kasper, C. B., Rodrigues, M. L. da F., Severo, M. M., Cherem, J. J., Azambuja, R. B., Queirolo, D., Souza Junior, P. de, Moro, M. E. B., Silva, F. P. da, Carlos, I. R., Montes, M. A., & Silva, L. G. (2024). The last and endangered maned wolves (*Chrysocyon brachyurus*) from southern Brazil and Uruguay: New records and spatial distribution modeling. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 59(3), 920–930. <https://doi.org/10.1080/01650521.2023.2285870>
- Keith, H., Vardon, M., Obst, C., Young, V., Houghton, R. A., & Mackey, B. (2021). Evaluating nature-based solutions for climate mitigation and conservation requires comprehensive carbon accounting. *Science of the Total Environment*, 769, 144341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144341>
- Keith, D. A., Ferrer-Paris, J. R., Ghoraba, S. M. M., Henriksen, S., Monyeke, M., Murray, N. J., Nicholson, E., Rowland, J., Skowno, A., Slingsby, J. A., Storeng, A. B., Valderrábano, M., & Zager, I. (Eds.). (2024). *Guidelines for the application of IUCN Red List of Ecosystems categories and criteria* (Version 2.0). IUCN. <https://doi.org/10.2305/CJDF9122>
- Lemes, P., Melo, A. S., & Loyola, R. D. (2014). Climate change threatens protected areas of the

Atlantic Forest. *Biodiversity and Conservation*, 23(2), 357–368. <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0605-2>

Lucresia, L., Meagher, T. R., & Sano, P. T. (2025). A Brazilian bioregionalization reappraisal based on angiosperm distribution: A biogeographical and conservation overview. *Acta Botanica Brasilica*, 39, e20240279. <https://doi.org/10.1590/1677-94IX-ABB-2024-0279>

Malecha, A., Manes, S., & Vale, M. M. (2025). Climate change and biodiversity in Brazil: What we know, what we don't, and Paris Agreement's risk reduction potential. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 23, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2025.03.004>

Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, F. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International Journal of Remote Sensing*, 39(9), 2784–2817. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>

Metzger, J. P., Martensen, A. C., Dixo, M., Bernacci, L. C., Ribeiro, M. C., Teixeira, A. M. G., & Pardini, R. (2009). Time-lag in biological responses to landscape changes in a highly dynamic Atlantic forest region. *Biological Conservation*, 142, 1166–1177. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.01.033>

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima do Brasil. (2025a). *Estratégia e plano de ação nacionais para a biodiversidade – EPANB 2025–2030* [Recurso eletrônico]. Autor

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2025b). *Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas na Mata Atlântica (PPMata Atlântica) (2025–2027)* [Recurso eletrônico]. Autor

Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>

Oliveira-Filho, A. T., & Fontes, M. A. L. (2000). Patterns of floristic differentiation among Atlantic forests in southeastern Brazil and the

influence of climate. *Biotropica*, 32(4B), 793–810. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2000.tb00619.x>

Oswald, C. B., Silveira, F. A. O., Cornelissen, T., Costa, L. M., Costa, H. C., Dagosta, F. C. P., Domingos, F. M. C. B., Eterovick, P. C., Freitas, G. H. S., Guedes, T. B., Guerra, T. J., Goulart, F. F., Hoffmann, D., Leite, F. S. F., Machado, C. G., Maruyama, P. K., Oliveira, H. J., Perini, F. A., Pezzutti, T. L., ... Magalhães, R. F. (2025). Biogeography and evolution of the vertebrate fauna in campo rupestre, a megadiverse Neotropical montane open ecosystem. *Biological Journal of the Linnean Society*, 145(1), 1–32. <https://doi.org/10.1093/biolinlean/blaf032>

Peres, E. A., Pinto-da-Rocha, R., Lohmann, L. G., Michelangeli, F. A., Miyaki, C. Y., & Carnaval, A. C. (2020). Patterns of species and lineage diversity in the Atlantic Rainforest of Brazil. In V. Rull & A. C. Carnaval (Eds.), *Neotropical diversification: Patterns and processes*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31167-4_16

Pinto, L. P., Bedê, L., Paese, A., Fonseca, M., Paglia, A., & Lamas, I. (2006). Mata Atlântica brasileira: Os desafios para conservação da biodiversidade de um hotspot mundial. In C. F. D. Rocha, H. G. Bergallo, M. Van Sluys, & M. A. S. Alves (Eds.), *Essências em biologia da conservação* (pp. 69–96). Editora Rima.

Pizzardo, R. C., Nic Lugdha, E., Rando, J. G., Forest, F., Nogueira, A., Prochazka, L. S., Walker, B. E., & Vasconcelos, T. (2024). An assessment of methods to combine evolutionary history and conservation: A case study in the Brazilian campo rupestre. *Applications in Plant Sciences*, 11(3), e11587. <https://doi.org/10.1002/aps3.11587>

Prado, D. E., & Gibbs, P. E. (1993). Patterns of species distributions in the dry seasonal forests of South America. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 80(4), 902–927.

Pupin, N. C., Brusquetti, F., Leite, F. S. F., & Haddad, C. F. B. (2025). Diversification in old, climatically buffered, infertile landscapes: Tracing the evolutionary history of a frog clade (*Bokermannohyla*: Hylidae) that is endemic to campo rupestre. *Zoological Journal of the*

Linnean Society, 205(1), zlaf108.
<https://doi.org/10.1093/zoolinnean/zlaf108>

Rapini, A., Ribeiro, P. L., Lambert, S., & Pirani, J. R. (2008). A flora dos campos rupestres da Cadeia do Espinhaço. *Megadiversidade*, 4(1–2), 16–24.

Ribeiro, M. C., Metzger, J. P., Martensen, A. C., Ponzoni, F. J., & Hirota, M. M. (2009). The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, 142, 1141–1153.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021>

Rivadeneira, C. D., Meyer, A. S., Bornschein, M. R., Ribeiro, L. F., & Pie, M. R. (2025). Ecological niche modelling of microendemic species: Understanding the distribution of montane frogs in the southern Brazilian Atlantic Forest. *Austral Ecology*, e70085.
<https://doi.org/10.1111/aec.70085>

Robinson, M., de Souza, J. G., Maezumi, S. Y., Cárdenas, M., Pessenda, L., Prufer, K., Corteletti, R., Scunderlick, D., Mayle, F. E., de Blasis, P., & Iriarte, J. (2018). Uncoupling human and climate drivers of late Holocene vegetation change in southern Brazil. *Scientific Reports*, 8(1), 7800.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-24429-5>

Safford, H. D. (2007). Brazilian páramos IV. Phytogeography of the campos de altitude. *Journal of Biogeography*, 34, 1701–1722.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01732.x>

Silveira, F. A. O., Negreiros, D., Barbosa, N. P. U., Buisson, E., Carmo, F. F., Carstensen, D. W., Conceição, A. A., Cornelissen, T. G., Echternacht, L., Fernandes, G. W., Garcia, Q. S., Guerra, T. J., Jacobi, C. M., Lemos-Filho, J. P., Le Stradic, S., Morellato, L. P. C., Neves, F. S., Oliveira, R. S., Schaefer, C. E., ... Lambers, H. (2016). Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: A neglected conservation priority. *Plant and Soil*, 403, 129–152. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2637-8>

Tabarelli, M., Aguiar, A. V., Grillo, A., & Santos, A. (2006). Fragmentação e perda de habitat na floresta Atlântica ao norte do Rio São Francisco.

In J. A. da Siqueira Filho & E. M. C. Leme (Eds.), *Fragmentos de Mata Atlântica do Nordeste: Biodiversidade, conservação e suas bromélias* (pp. 80–99). Andrea Jacobsson Estúdio Editorial Ltda.

Vancine, M. H., Muylaert, R. L., Neeb-Bührig, B. B., Oshima, J. E. F., Tonetti, V., Bernardo, R., De Angelo, C., Reis, M. R., Grohmann, C., Ribas, C. R., & Ribeiro, M. C. (2024). The Atlantic Forest of South America: Spatial-temporal dynamics of the vegetation and implications for conservation. *Biological Conservation*, 291, 110499.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110499>

Vasconcelos, M. F. (2011). O que são campos rupestres e campos de altitude nos topos de montanha do leste do Brasil? *Revista Brasileira de Botânica*, 34(2), 241–246.
<https://doi.org/10.1590/S0100-84042011000200012>