

PESQUISA EM FOCO

Ameaça silenciosa: análise histórica e tendências futuras da supressão dos campos naturais do bioma Pampa pela expansão agrícola

Daniel Dutra Saraiva¹, Fábio Piccin Torchelsen¹, Gerhard Ernst Overbeck², Sandra Cristina Müller³, Heinrich Hasenack^{3,4}, Leonardo Marques Urruth⁵, Cassio Rabuske da Silva⁶

Resumo: O Pampa apresenta desafios críticos, sendo o bioma brasileiro com a menor extensão de áreas protegidas e a maior taxa de perda proporcional de vegetação nativa. Neste estudo, investigamos a supressão histórica da vegetação campestre nativa no bioma Pampa com base em dados anuais do MapBiomas (1985–2023). Utilizamos um modelo linear generalizado (GLM) com estrutura de autocorrelação temporal para analisar o impacto da expansão das áreas de cultivo de soja e silvicultura na perda de vegetação campestre, focando nos municípios com as maiores perdas. Por meio de modelagem preditiva, projetamos cenários futuros de perda do patrimônio campestre em áreas privadas (~85% da área total do bioma), integrando variáveis temporais e espaciais derivadas das tendências históricas. Os resultados evidenciam uma aceleração preocupante na supressão campestre do Pampa, com intensificação marcante nas últimas duas décadas. Enquanto os períodos iniciais (1985–1990 e 1985–1995) registraram perdas mínimas, os mais recentes (2013–2023 e 2018–2023) alcançaram níveis críticos. Em 38 anos, a perda acumulada de vegetação campestre nativa alcançou 3,5 milhões de hectares (38,55%). A partir de 2003, a supressão se intensificou, com perdas de 29,98% da área remanescente naquele ano e 26,4% da área original de 1985. Quatro mesorregiões gaúchas concentraram 85,2% dos municípios com maiores perdas: Sudeste (25,9%), Centro Ocidental (20,4%), Metropolitana de Porto Alegre (20,4%) e Sudoeste (18,5%). Nos

1 – Campo & Mato Pesquisa e Consultoria Ambiental, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil (daniel.dutra.saraiva@gmail.com; fpiccin@gmail.com)

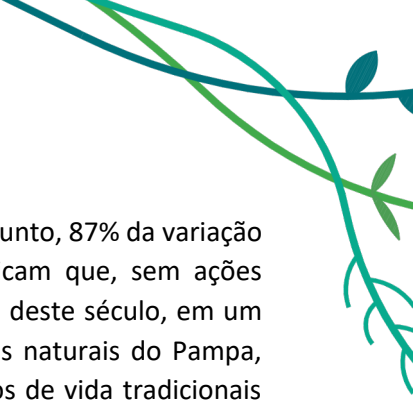
2 – Departamento de Botânica, Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil (gerhard.overbeck@ufrgs.br)

3 – Departamento de Ecologia, Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil (sandra.muller@ufrgs.br)

4 – Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil (heinrich.hasenack@ufrgs.br)

5 – Associação dos Servidores da Secretaria do Meio Ambiente do RS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil (leourruth@gmail.com)

6 – Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, Distrito Federal, Brasil (cassio.silva@mma.gov.br)



municípios com maiores perdas, a expansão da soja e da silvicultura explicou, em conjunto, 87% da variação total na supressão da vegetação campestre. Nossas projeções mais robustas indicam que, sem ações imediatas, os campos nativos em áreas privadas poderão desaparecer antes do final deste século, em um período de 64 a 73 anos. Os resultados evidenciam a rápida conversão dos campos naturais do Pampa, ameaçando sua rica biodiversidade, os serviços ecossistêmicos essenciais e os modos de vida tradicionais que deles dependem. Implementar políticas eficazes é essencial para mitigar esse processo, garantindo a preservação do patrimônio ambiental e cultural do Pampa para as futuras gerações.

Palavras-chave: biodiversidade, cenários futuros, Campos Sulinos, conservação, impactos da agropecuária, MapBiomias, mudanças na cobertura e uso da terra, política ambiental, perda de vegetação nativa

Abstract: *The Brazilian Pampa faces critical challenges. It has the smallest extent of protected areas and the highest proportional rate of native vegetation loss among Brazilian phytogeographic domains. In this study, we investigated the historical suppression of native grassland vegetation in the Pampa biome using annual MapBiomias data (1985–2023). A generalized linear model (GLM) with a temporal autocorrelation structure was employed to analyze the impact of expanding soybean cropland and silviculture areas on grassland loss, focusing on municipalities with the highest losses. Through predictive modeling, we projected future scenarios of grassland heritage loss in private areas (~85% of the biome's total area), integrating spatiotemporal variables derived from historical trends. The results reveal a concerning acceleration in grassland suppression, intensifying markedly over the past two decades. While initial periods (1985–1990 and 1985–1995) showed minimal losses, recent intervals (2013–2023 and 2018–2023) reached critical levels. Over 38 years, cumulative native grassland loss reached 3.5 million hectares (38.55% of the original 1985 extent). Post-2003, suppression escalated sharply, with losses equivalent to 29.98% of the remaining grassland area in 2003 and 26.4% of the original 1985 area. Four Rio Grande do Sul mesoregions accounted for 85.2% of municipalities with the highest losses: Southeast (25.9%), Central-Western (20.4%), Metropolitan Porto Alegre (20.4%), and Southwest (18.5%). In the municipalities with the greatest losses, the expansion of soybean and silviculture together explained 87% of the total variation in grassland suppression. Our most robust projections indicate that, without immediate intervention, native grasslands in private areas could disappear before the end of this century, within 64–73 years. The results highlight the rapid conversion of the Pampa's natural grasslands, threatening its rich biodiversity, essential ecosystem services, and the traditional ways of life that depend on them. Implementing effective policies is essential to mitigating this process and ensuring the preservation of the Pampa's environmental and cultural heritage for future generations.*

Keywords: biodiversity, future scenarios, Campos Sulinos, conservation, impacts of agriculture and livestock farming, MapBiomias, land use change, environmental policy, native vegetation loss

Introdução

A supressão da vegetação nativa decorrente da expansão agrícola resulta em perda de habitat e fragmentação, uma das principais ameaças à manutenção de espécies nativas, além de provocar a diminuição ou perda de diversos serviços ecossistêmicos essenciais para as populações humanas. Nos campos do Pampa, essa ameaça avança de forma silenciosa, porém acelerada. Silenciosa, porque a mudança na fisionomia das paisagens é menos abrupta para a maioria das pessoas, cujo olhar, geralmente menos atento e treinado, não percebe os ecossistemas característicos do Pampa – os campos, que são a base para a produção animal e representam a vocação natural do bioma (**Figura 1**). Assim, milhares de hectares de campos nativos vêm sendo transformados, ano após ano, sem causar comoção ou alarde, como provavelmente ocorreria se fossem florestas nativas. As consequências para a natureza e para a sociedade, contudo, são igualmente trágicas, especialmente para as gerações futuras, que deixarão de ter a oportunidade de conhecer e usufruir de seus inúmeros serviços e potencialidades, além dos impactos pela perda de biodiversidade e de serviços ecossistêmicos. Essa mudança, no entanto, ocorre a passos largos: O Pampa registrou a maior perda proporcional de vegetação nativa entre os biomas brasileiros, com uma redução de 28% entre 1985 e 2023, segundo dados do MapBiomas¹. Além disso, foi o bioma com a maior proporção de municípios que apresentaram perdas expressivas de cobertura vegetal nativa no mesmo período¹. No Pampa Sul-Americano, também conhecido como *Pastizales del Río de la Plata*^{2,3}, a maior perda de vegetação campestre nativa nas últimas quatro décadas ocorreu no Pampa brasileiro⁴. Foram perdidos 3,5 milhões de hectares (Mha), em comparação com 3,2 Mha na Argentina e 2,7 Mha no Uruguai. Essas perdas significativas em toda a região Pampeana foram impulsionadas principalmente pela expansão da agricultura (8,4 Mha) e da silvicultura (2,2 Mha). O cultivo anual, com destaque para a soja, ocupou a maior área, enquanto a silvicultura apresentou o maior aumento percentual (415%)⁴.

A rápida transformação no uso do solo no Pampa Sul-Americano^{2,3}, além de intensificar a perda e a fragmentação dos campos nativos, ameaça a conservação da biodiversidade e pode levar ao colapso da pecuária extensiva em áreas campestres, comprometendo gravemente os serviços ecossistêmicos associados⁵. Embora o Pampa tenha sido oficialmente reconhecido em 2004, com sua inclusão no Mapa de Biomas do Brasil⁶, e a Lei de Proteção da Vegetação Nativa – LPVN (Lei nº 12.651/2012⁷) tenha sido sancionada há mais de uma década, ainda não foram implementadas regulamentações condizentes com as melhores práticas de uso e conservação do bioma. Nos últimos anos, normativos estaduais, como o Decreto nº 52.431/2015⁸ e a Lei nº 15.434/2020⁹, regulamentaram o Cadastro Ambiental Rural (CAR) e o Programa de Regularização Ambiental (PRA) no Rio Grande do Sul (RS), classificando campos nativos sob manejo pastoril anteriores a 2008 como “áreas rurais consolidadas”. Essa definição, criticada por fragilizar exigências da LPVN, como Reserva

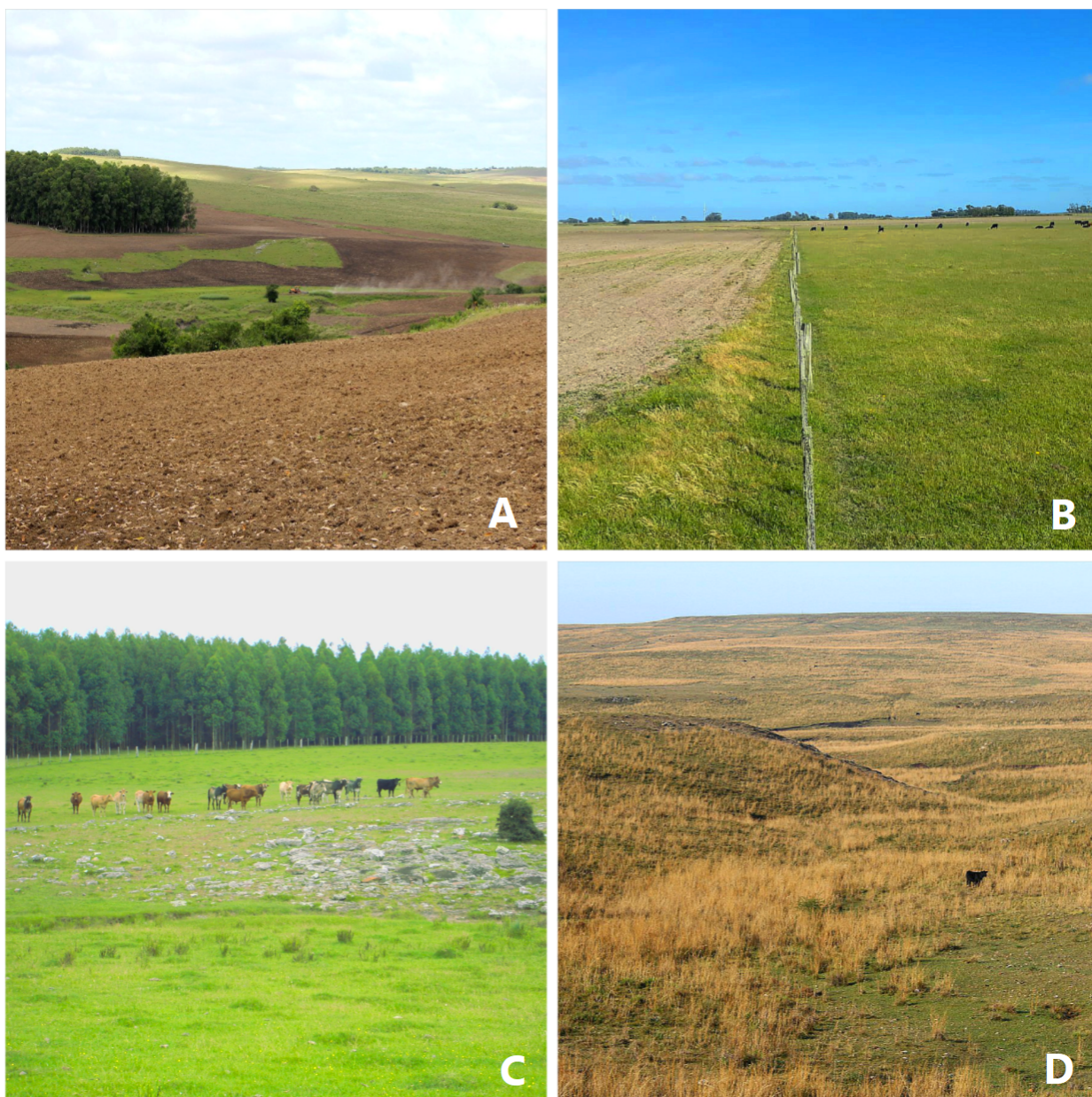
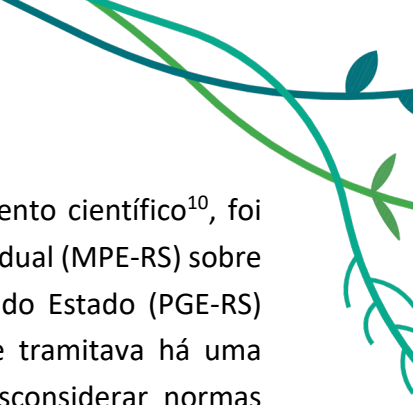


Figura 1. Exemplos de mudanças no uso da terra no bioma Pampa e seus contrastes com práticas tradicionais de manejo pastoril. (A) Supressão de campo nativo para o cultivo de soja em Jaguarão, RS. (B) Comparação entre campo com semeadura de soja em estágio inicial (à esquerda) e campo nativo destinado à pecuária extensiva (à direita) em Santa Vitória do Palmar, RS. (C) Contraste entre uma área de silvicultura (eucalipto) e campo nativo manejado para pecuária extensiva. (D) Campo nativo preservado com pecuária extensiva na Área de Proteção Ambiental do Ibirapuitã, em Sant'Ana do Livramento, RS.



Legal (RL) e Área de Preservação Permanente (APP), e carecer de embasamento científico¹⁰, foi suspensa por decisão judicial após questionamentos do Ministério Público Estadual (MPE-RS) sobre a aplicação do CAR no bioma Pampa. Recentemente, a Procuradoria-Geral do Estado (PGE-RS) firmou um Termo de Autocomposição encerrando a Ação Civil Pública que tramitava há uma década. O acordo resolve o impasse gerado por uma liminar que, ao desconsiderar normas transitórias da LPVN, inviabilizava a regularização da RL em propriedades rurais. Esse acordo define que o pastoreio não caracteriza uso consolidado, exceto onde havia edificações, benfeitorias ou substituição da vegetação nativa por espécies exóticas invasoras. Embora o acordo exija análise técnica para delimitar áreas consolidadas, a presença de espécies exóticas invasoras em campos nativos sob manejo pastoril pode ser usada como pretexto para essa classificação. Assim, mesmo sob pastoreio, a degradação prévia pode abrir brechas para flexibilização, dependendo dos critérios normativos estabelecidos pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente (Sema), evidenciando a necessidade de transparência e rigor técnico-científico para evitar retrocessos na proteção do bioma Pampa. Além disso, persistem desafios estruturais. A fiscalização ambiental ainda depende majoritariamente de denúncias e alertas de desmatamento, que não abrangem a supressão da vegetação campestre nativa, conforme a Lei Complementar nº 140/2011¹¹. Paralelamente, a Sema não avança na análise sistemática do CAR nem na implementação do PRA para infrações à LPVN, perpetuando a insegurança jurídica e reforçando a necessidade de fiscalização ativa e presencial no território.

Compreender os fatores responsáveis pela supressão passada e projetar cenários futuros são condições fundamentais para planejar mudanças econômicas e ambientais em prol de um futuro mais sustentável. Neste estudo, abordamos a dinâmica histórica, os fatores determinantes e os cenários futuros de transformação nos campos naturais do bioma Pampa. Primeiramente, analisamos a supressão da vegetação campestre nas últimas quatro décadas (1985–2023), utilizando dados do projeto MapBiomias e considerando padrões temporais e espaciais em duas escalas complementares: a escala do bioma e a escala municipal. Em seguida, investigamos o papel das atividades agropecuárias, com ênfase na soja e na silvicultura, como principais vetores de conversão dos campos naturais. O objetivo foi quantificar a influência direta dessas atividades na perda de vegetação campestre nativa, com especial atenção às implicações da expansão dessas práticas sobre o bioma. Por fim, desenvolvemos modelos preditivos para projetar a continuidade das tendências de supressão em diferentes cenários futuros. Esses modelos incorporam as tendências históricas nas taxas de supressão e expansão agrícola, explorando cenários de intensificação, estabilização ou mitigação da perda de vegetação campestre nativa. Esperamos que os resultados deste estudo proporcionem uma compreensão detalhada das transformações no bioma Pampa, oferecendo subsídios robustos para a formulação de políticas públicas e ações que conciliem a conservação ambiental com a produção agropecuária.

Material e métodos

Dados históricos de cobertura e uso da terra no Pampa

Neste estudo, utilizamos dados de cobertura e uso da terra do bioma Pampa provenientes da Coleção 9 do MapBiomas¹, abrangendo o período de 1985 a 2023 (<https://brasil.mapbiomas.org/estatisticas/>). O MapBiomas é uma iniciativa colaborativa integrada por organizações não governamentais, instituições acadêmicas e empresas de tecnologia, com o objetivo de mapear e monitorar sistematicamente a cobertura vegetal e o uso da terra em todo o Brasil (<https://brasil.mapbiomas.org/quem-somos/>). O processo de mapeamento do MapBiomas baseia-se em séries temporais de imagens de satélite, processadas por um sistema automatizado de classificação que é revisado e refinado por especialistas. A Coleção 9 do MapBiomas fornece mapas anuais de uso e cobertura do solo para o bioma Pampa, com uma resolução espacial de 30 metros, o que permite uma análise detalhada das mudanças ao longo do tempo. Essa coleção alcança uma acurácia global de 86%, o que assegura a confiabilidade dos dados para análises científicas rigorosas¹².

Focamos exclusivamente na supressão vegetal associada à classe “Formação Campestre”, analisando perdas diretas dessa cobertura. Essa escolha reflete nossa preocupação em compreender as dinâmicas específicas da vegetação campestre nativa, considerando sua relevância ecológica e a magnitude das transformações sofridas ao longo do tempo.

Dinâmica histórica da supressão de vegetação campestre nativa no Pampa

Distribuição dos incrementos anuais de supressão

O incremento de desmatamento/supressão corresponde à diferença entre a área desmatada/suprimida acumulada em dois períodos consecutivos, refletindo o aumento anual na perda de cobertura vegetal. Embora o termo “desmatamento” seja amplamente utilizado para se referir à perda de vegetação nativa no Brasil, neste trabalho fazemos uma distinção ao adotar o termo “supressão” especificamente para descrever a perda de vegetação campestre nativa, excluindo outras formas de cobertura vegetal, como as florestas¹³.

Os incrementos anuais de supressão da vegetação campestre nativa foram determinados com base no cálculo utilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em seus programas de monitoramento do desmatamento por satélite, como o PRODES e o BiomassBR. Esses incrementos foram obtidos pela subtração da área suprimida acumulada no ano anterior (A_{t-1}) da área acumulada no ano atual (A_t).

A série histórica do MapBiomias revelou um pequeno aumento na cobertura campestre no Pampa entre os períodos de 1985 a 1986 (0,35%) e de 1986 a 1987 (1,06%). Entretanto, entre 1988 e 2023, foram registradas apenas perdas absolutas de cobertura campestre. Por esse motivo, o ano de 1988 foi definido como o ponto de partida para o cálculo dos incrementos anuais ao longo da série histórica do MapBiomias. A análise dos incrementos permite identificar picos e quedas na perda de vegetação, além de revelar padrões de aceleração ou desaceleração na taxa de supressão, fornecendo subsídios para projeções de cenários futuros e para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à conservação e restauração de ecossistemas campestres.

Análise comparativa das perdas percentuais em períodos distintos

Para calcular as perdas percentuais de vegetação campestre em diferentes intervalos temporais, utilizamos dois métodos complementares: (1) perda percentual com vegetação remanescente inicial variável e (2) perda percentual com vegetação remanescente inicial fixa. A vegetação inicial ou final de cada período corresponde à área ou cobertura de vegetação campestre nativa, expressa em hectares.

No método 1, cada intervalo temporal tem como referência a vegetação remanescente no início do período avaliado, variando conforme o ano inicial, mas mantendo 2023 como ano final. O cálculo considera a perda percentual acumulada em relação à vegetação inicial de cada período. O método 2 utiliza a vegetação remanescente de 1985 como referência fixa para calcular a perda percentual acumulada, variando conforme o ano final do intervalo. O método 1 é útil para identificar mudanças em intervalos específicos, permitindo monitorar tendências de aceleração ou desaceleração da supressão campestre em cada período. No entanto, sua interpretação pode ser menos intuitiva devido à variação no valor da referência inicial. O método 2 oferece uma abordagem mais intuitiva, pois a supressão é sempre em relação à mesma área inicial de vegetação. Apesar disso, essa padronização pode limitar a detecção de nuances em períodos mais curtos, tornando o método menos sensível a variações temporais específicas.

No método 1, os intervalos temporais foram estabelecidos da seguinte forma: 38 anos (1985–2023), 30 anos (1993–2023), 20 anos (2003–2023), 10 anos (2013–2023) e 5 anos (2018–2023). No método 2, os intervalos foram definidos da seguinte maneira: 38 anos (1985–2023), 30 anos (1985–2015), 20 anos (1985–2005), 10 anos (1985–1995) e 5 anos (1985–1990).

Em cada intervalo, foi aplicada a fórmula de perda percentual (PP) de vegetação campestre remanescente:

$$PP = \frac{(\text{Veg. inicial} - \text{Veg. atual})}{\text{Veg. inicial}} \times 100$$

É importante destacar que a fórmula PP se refere à taxa de decréscimo percentual (*percentage decrease rate*), uma métrica amplamente utilizada em diversas áreas do conhecimento. O MapBiomias adota essa medida para calcular as perdas de vegetação nativa nos biomas e formações vegetais. A PP normaliza os valores de perda em relação à área de vegetação remanescente no início do período avaliado, reduzindo vieses associados a diferenças absolutas de escala (ou seja, perdas absolutas podem ser mal interpretadas como mais ou menos importantes dependendo do tamanho total da vegetação remanescente) e permitindo comparações robustas e metodologicamente consistentes entre diferentes contextos temporais e espaciais.

A comparação entre períodos com bases distintas (valores iniciais diferentes) requer cautela na interpretação, pois a perda percentual é calculada sobre a área remanescente inicial de cada período: quanto menor essa área, maior o impacto relativo da perda absoluta. Trata-se de uma característica inerente à matemática proporcional. Para evitar conclusões equivocadas, explicitamos as bases de cálculo, combinando dados absolutos e relativos. Para fins de comparação textual, categorizamos as perdas absolutas em: muito alta (>2,5 Mha), alta (1,5–2,5 Mha), moderada (500 mil–1,5 Mha), baixa (100–500 mil ha) e muito baixa (<100 mil ha). Para as perdas percentuais, adotamos critérios equivalentes: muito alta (>30%), alta (20–30%), moderada (10–20%), baixa (5–10%) e muito baixa (<5%).

Distribuição das perdas percentuais ponderadas por município

A perda de vegetação campestre foi calculada para 227 municípios do bioma Pampa com cobertura campestre mapeada pelo MapBiomias. Alguns desses municípios incluem porções do bioma Mata Atlântica, mas a análise da perda de vegetação campestre se limita aos limites do bioma Pampa.

Calculamos a fórmula padrão da perda percentual (PP) utilizando a vegetação remanescente em 1985 como referência e a vegetação atual em 2023 como base de comparação. Em seguida, ajustamos os resultados com base na proporção da vegetação remanescente em relação à área total do município, resultando na perda percentual ponderada (PPP). Esse ajuste possibilita que municípios com áreas de vegetação remanescente relativamente pequenas ou grandes em relação à sua área total sejam corretamente ponderados.

A perda percentual ponderada (PPP) foi calculada utilizando a fórmula abaixo:

$$PPP = PP \times \left(\frac{\text{Veg. inicial}}{\text{Área total do município}} \right) \times 100$$

Nessa fórmula, a vegetação inicial remanescente presente no numerador do segundo termo e no denominador do primeiro termo (fórmula PP) se anulam, resultando em uma expressão equivalente à fórmula resumida apresentada abaixo.

$$PPP = \frac{(\text{Veg. inicial} - \text{Veg. atual})}{\text{Área total do município}} \times 100$$

Após calcular a PPP, inspecionamos os resultados para identificar possíveis vieses da ponderação. Por exemplo, em municípios com áreas muito pequenas de vegetação campestre, uma perda próxima de 100% pode resultar em um valor ponderado elevado. No entanto, o impacto real, em termos de área perdida, pode ser pequeno comparado a municípios de maiores dimensões. Os valores de PPP variaram entre 20% e 47%, sem extremos próximos de 100%. Diante desse intervalo relativamente controlado e da ausência de valores discrepantes, concluímos que não foi necessário aplicar um fator de normalização ou um ajuste para perdas extremas. No Apêndice I, são listados, em ordem decrescente, os 25% dos municípios com as maiores perdas percentuais ponderadas de vegetação campestre, juntamente com os respectivos aumentos absolutos nas áreas de soja e silvicultura.

Expansão agrícola como causa direta da supressão campestre no Pampa

Para analisar a relação entre a perda absoluta de vegetação campestre (em hectares) e o aumento das áreas de soja e silvicultura ao longo do tempo para os 25% dos municípios com maior perda ponderada, realizamos duas análises distintas: uma utilizando um modelo aditivo generalizado (GAM) e outra um modelo linear generalizado (GLM), ambos com uma estrutura de autocorrelação de primeira ordem (corAR1), apropriada para capturar a dependência serial nos dados anuais de perda de vegetação^{14,15}. Ambos os modelos foram ajustados com uma distribuição Gamma e função de ligação identidade, adequada para variáveis resposta contínuas, não negativas e com distorção positiva¹⁵. Para modelar a autocorrelação nos resíduos, utilizamos o modelo AR(1) autorregressivo (corAR1), que considera a dependência temporal entre observações consecutivas em séries temporais¹⁶. Isso permite um ajuste mais robusto, minimizando a influência da autocorrelação sobre a variabilidade dos estimadores. Após a aplicação do GAM a partir de variáveis explicativas suavizadas (s(ganho soja) + s(ganho silvicultura)) para capturar possíveis efeitos não-lineares¹⁶, observamos que a inclusão de termos suaves para o ganho de soja não proporcionou uma melhoria significativa na adequação do modelo em comparação com uma abordagem linear simplificada. Os resultados da análise linear mostraram que o ganho de silvicultura teve um efeito linear significativo na perda de vegetação, enquanto a relação do ganho de soja, embora ligeiramente não-linear, foi adequadamente modelada na estrutura linear escolhida. Portanto, optamos por um modelo linear devido à sua simplicidade e interpretabilidade, que demonstrou ser eficaz na captura das principais relações entre as variáveis, evitando a complexidade adicional associada à inclusão de termos não lineares. Para avaliar a qualidade do ajuste, utilizamos o pseudo-R² de McFadden, calculado como 1 – desvio residual/desvio nulo, o que fornece uma medida da proporção da variação na perda de

vegetação campestre nativa, que é explicada pelas variáveis de ganho de área de soja e silvicultura. Os modelos GAM e GLM foram implementados no R usando a função `gam()` do pacote `mgcv`¹⁷.

Modelos preditivos para cenários futuros de perda do patrimônio campestre

Para projetar cenários e modelos que ofereçam perspectivas sobre o futuro dos campos do Pampa, iniciamos nossa investigação analisando a relação entre a taxa de incremento de supressão anual e a taxa de incremento de área agrícola anual. Em seguida, exploramos as tendências temporais (crescente, decrescente ou estacionária) nos incrementos anuais de supressão e expansão agrícola. A expansão agrícola, conforme mapeada pelo MapBiomas, refere-se à classe “agropecuária”, que abrange a totalidade da pastagem cultivada, agricultura (tanto lavouras temporárias quanto perenes), silvicultura e mosaicos de uso, que consistem em áreas agrícolas nas quais não foi possível distinguir entre pastagem cultivada e agricultura. Utilizamos a regressão de Prais-Winsten¹⁸ para modelar essas relações, com o intuito de corrigir a autocorrelação serial presente nos dados. As tendências identificadas pelos coeficientes da regressão foram posteriormente incorporadas nos modelos de cenários futuros. O método de Prais-Winsten corrige a autocorrelação de primeira ordem nos resíduos (`corAR1`), garantindo uma análise mais robusta e precisa das relações temporais, especialmente em dados onde as observações de um ano tendem a ser correlacionadas com as dos anos anteriores¹⁹. A implementação deste método foi realizada por meio da função `prais_winsten()` do pacote `prais` no R²⁰.

A taxa de incremento anual de supressão (TIAS) foi calculada para representar valores positivos de perda, conforme a fórmula abaixo:

$$TIAS = \frac{-(\text{Veg. do ano atual} - \text{Veg. do ano anterior})}{\text{Veg. do ano anterior}} \times 100$$

A TIAS mede o aumento percentual da supressão entre anos consecutivos na série temporal, proporcionando uma representação clara do incremento anual de perda e facilitando a análise de tendências e a comparação com a expansão agrícola. Já a taxa de incremento anual da área agrícola foi calculada sem o sinal negativo, uma vez que os valores refletem uma tendência de crescimento ao longo do tempo.

Com o objetivo de aprofundar a compreensão e a previsão das mudanças na vegetação campestre do Pampa ao longo do tempo, implementamos vários modelos, simulando cenários com complexidade crescente. A progressão desses modelos reflete uma transição de abordagens simplistas – baseadas em modelos determinísticos que desconsideram variações temporais e incertezas – para modelos mistos mais sofisticados, que integram componentes determinísticos e estocásticos. Esses modelos utilizam equações diferenciais simples, como o modelo de decaimento

exponencial, amplamente aplicado em ecologia para descrever fenômenos como a redução de populações e a diminuição de recursos naturais^{21,22}. Cada cenário subsequente é fundamentado no anterior, proporcionando perspectivas mais robustas e realistas sobre as dinâmicas de supressão da vegetação campestre no bioma Pampa. Uma descrição detalhada dos modelos e suas variáveis está disponível no Apêndice II.

Resultados e Discussão

Mudanças na cobertura e uso da terra no bioma Pampa: ganhos e perdas

Os dados do MapBiomas (1985-2023) revelaram mudanças significativas nas paisagens campestres do bioma Pampa (**Figura 2**). Em 1985, as formações não florestais, compostas por vegetação herbácea e arbustiva, ocupavam 49% do bioma (sendo 48% de vegetação campestre). Atualmente, essa cobertura foi reduzida para 31%. Em números absolutos, a vegetação herbácea e arbustiva diminuiu de 9,6 Mha para 6,1 Mha, com uma perda de 3,5 Mha (36%). A vegetação campestre, especificamente, foi reduzida de 9,1 Mha para 5,6 Mha, perdendo 3,5 Mha (38,6%). Em contraste, as formações florestais nativas mantiveram-se estáveis, com um leve aumento de 2,2 Mha para 2,4 Mha, ganhando 166 mil hectares (7,5%).

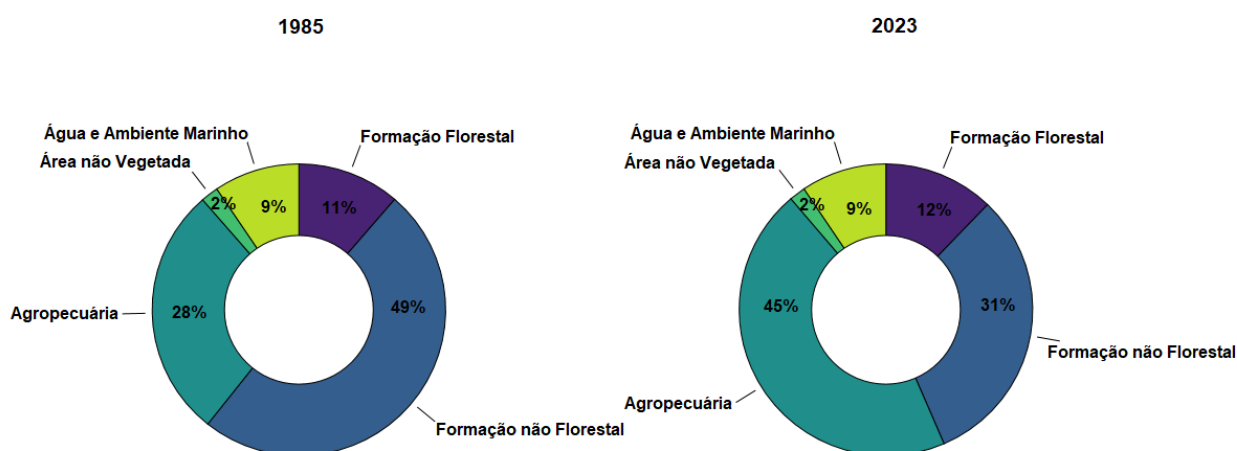


Figura 2. Mudança nas classes de cobertura e uso da terra no bioma Pampa entre 1985 e 2023.

A área destinada à agropecuária (pastagem cultivada, agricultura e silvicultura) expandiu-se significativamente, passando de 5,4 Mha em 1985 para 8,8 Mha em 2023, um aumento de 3,4 Mha (62%). A agricultura de culturas temporárias teve destaque, com a soja liderando o crescimento: de 0,8 Mha em 1985 para 4,0 Mha em 2023, um salto de 3,2 Mha (387%). O arroz também registrou

crescimento expressivo, passando de 0,4 Mha para 0,7 Mha no mesmo período, com um ganho de 0,3 Mha (71,5%). Por outro lado, outras culturas temporárias tiveram queda acentuada, reduzindo-se de 2,4 Mha para 0,8 Mha, uma perda de 1,5 Mha (64,9%). Já a silvicultura (cultivo de árvores exóticas em monocultura) apresentou crescimento exponencial, saindo de 44,2 mil hectares em 1985 para 772,6 mil hectares em 2023, um aumento de 728,4 mil hectares (1.649%).

Dinâmica histórica da supressão da vegetação campestre nativa no Pampa

Distribuição dos incrementos anuais de supressão campestre

A análise dos incrementos anuais de supressão da vegetação campestre nativa (em hectares) revelou ciclos de oscilação ao longo do período estudado (**Figura 3**) com variações significativas em relação à tendência central (mediana = 106.750 ha). O ano de 2000 registrou o menor valor de perda de vegetação campestre, com apenas 681 hectares. Entre 2001 e 2005, observamos uma retomada constante nas taxas de supressão, com picos em 2003 (156,9 mil ha) e 2005 (114,6 mil ha), indicando uma intensificação da supressão nesses anos. No período de 2006 a 2010, as taxas de supressão caíram drasticamente em 2006 (25,9 mil ha) e 2008 (13,0 mil ha), mas voltaram a subir de forma expressiva em 2010 (139,5 mil ha). Entre 2011 e 2015, os valores de supressão mantiveram-se elevados, com picos em 2011 (159,1 mil ha) e 2012 (148,5 mil ha), seguidos por uma diminuição em 2015 (36,9 mil ha). A partir de 2016, a supressão voltou a crescer, atingindo um pico em 2019 (205,2 mil ha). O período de 2020 a 2023 destacou-se pelos valores mais altos de supressão, com um pico máximo em 2021 (242,1 mil ha), seguido por reduções em 2022 (147,0 mil ha) e 2023 (132,3 mil ha). Apesar das variações anuais, evidenciamos uma tendência de aumento na supressão da vegetação campestre nativa nos últimos anos. Entre 2019 e 2021, por exemplo, os valores registrados foram consistentemente superiores à mediana histórica. Essa tendência de aumento é corroborada pela análise das medianas em diferentes períodos: 106,8 mil ha (38 anos), 130,5 mil ha (20 anos), 140,5 mil ha (10 anos) e 205,2 mil ha (5 anos). A tendência significativa de aumento na taxa de incremento anual de supressão foi confirmada por um modelo de regressão aplicado à série temporal (ver **Figura 4**).

Análise comparativa das perdas percentuais em períodos distintos

A análise das perdas de vegetação campestre nativa no bioma Pampa ao longo de diferentes períodos revelou uma tendência clara de aceleração da supressão, especialmente nas últimas duas décadas (**Tabela 1**). Enquanto os períodos iniciais (1985-1990 e 1985-1995) registraram perdas absolutas e percentuais mínimas, refletindo uma pressão reduzida sobre a vegetação campestre, os períodos mais recentes apresentaram perdas substancialmente mais altas, atingindo níveis críticos.

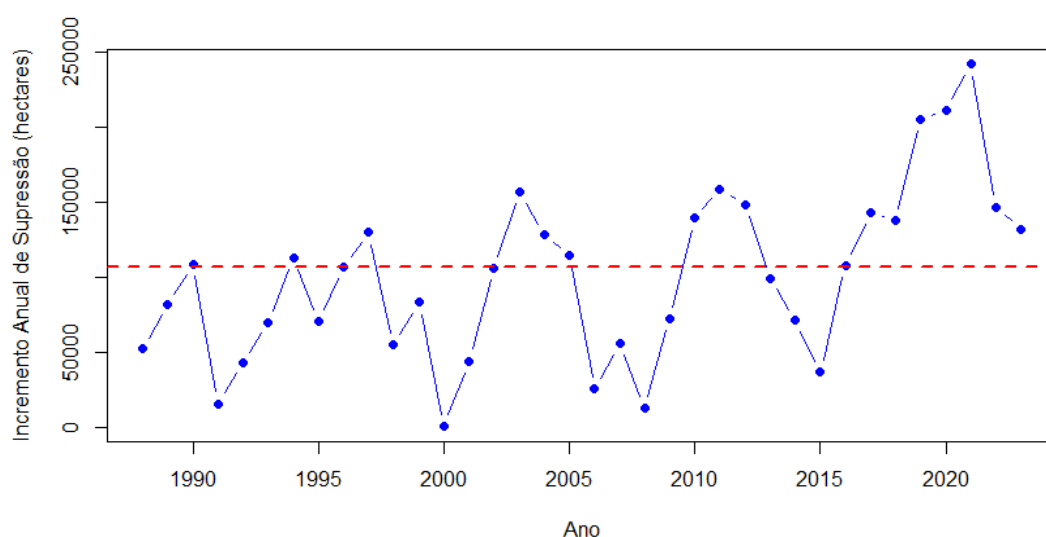


Figura 3. Incremento anual na supressão da vegetação campestre nativa no bioma Pampa no período de 1988 a 2023. A linha tracejada representa a mediana histórica dos incrementos anuais (106.750 ha/ano).

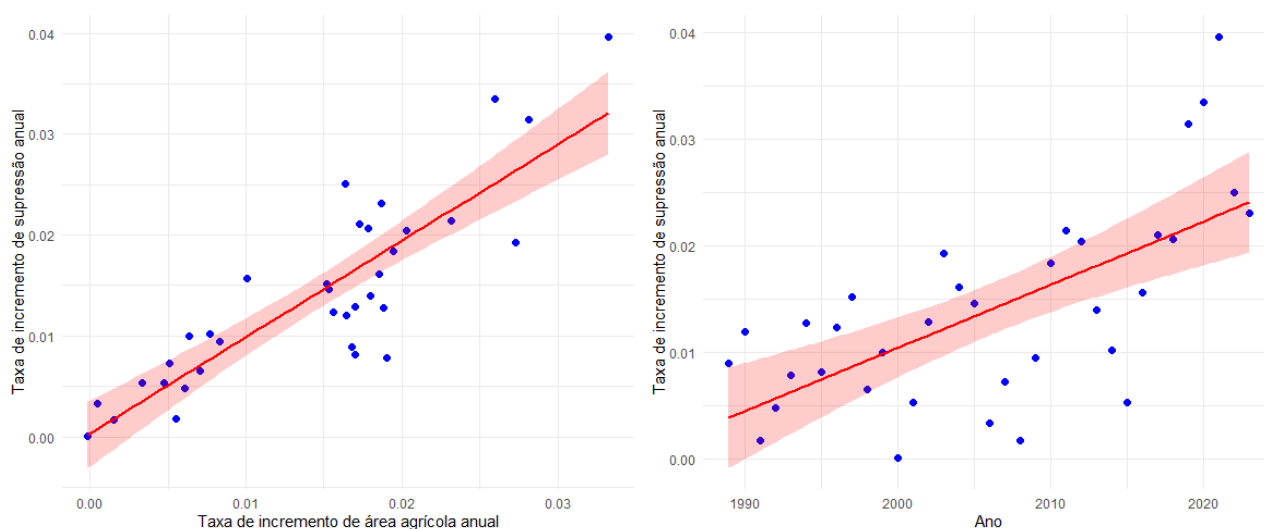


Figura 4. Relação entre os incrementos percentuais de supressão da vegetação campestre, os incrementos percentuais de área agrícola (pastagem cultivada, agricultura e silvicultura) e o fator temporal no bioma Pampa.

No período completo de 1985 a 2023, a supressão acumulada atingiu níveis muito altos, tanto em termos absolutos (3,5 Mha) quanto percentuais (38,55%), refletindo uma perda constante ao longo das décadas, mas com uma aceleração marcante nos anos mais recentes. Por exemplo, no

período de 1993 a 2023, as perdas percentuais e absolutas foram próximas às do período completo (**Tabela 1**). Esse aumento coincide com a expansão de atividades agropecuárias, especialmente o cultivo de soja e de árvores exóticas, como o eucalipto, que tiveram uma expansão significativa a partir dos anos 2000. A partir de 2003, a supressão entrou em uma fase de aceleração inicial, com perdas expressivas que se mantiveram elevadas até 2023 (29,98% da área remanescente em 2003 e 26,4% da área remanescente em 1985). Esse padrão foi ainda mais pronunciado na última década (2013-2023), quando a perda atingiu níveis preocupantes, evidenciando uma aceleração recente da supressão (20,44% da área de 2013 e 15,4% da área de 1985). Nos últimos cinco anos (2018-2023), a supressão atingiu seu ponto mais crítico, com uma perda proporcionalmente elevada em relação à vegetação remanescente, totalizando aproximadamente 1 milhão de hectares (14,37% da área de 2018 e 11,2% da área de 1985).

A classificação das perdas percentuais foi consistente com as perdas absolutas, refletindo a magnitude da supressão da vegetação campestre (**Tabela 1**). Períodos com perdas absolutas elevadas, como 1985-2023 e 1993-2023, também apresentaram perdas percentuais muito altas, confirmando a intensidade do processo. Nos períodos mais recentes, como 2013-2023 e 2018-2023, a classificação moderada se manteve em ambos os critérios, demonstrando que, apesar da redução na área total suprimida, a pressão sobre a vegetação remanescente continuou significativa. Em períodos mais curtos, como 1985-1995, a menor supressão absoluta acompanhou perdas percentuais proporcionalmente baixas, garantindo a coerência da classificação.

Distribuição das perdas percentuais ponderadas por município

A **Tabela 2** destaca os 20 municípios com as maiores perdas percentuais ponderadas (PPP) de vegetação campestre nativa no bioma Pampa. A lista completa dos municípios que integram o quartil superior de perda (top 25%) está disponível no Apêndice I. Os municípios podem ser visualizados no mapa das Regiões Geográficas do Rio Grande do Sul, publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (https://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/divisao_regional/divisao_regional_do_brasil/divisao_regional_do_brasil_em_regioes_geograficas_2017/mapas/43_regioes_geograficas_rio_grande_do_sul.pdf).

Os municípios do Pampa analisados revelaram padrões distintos de perda entre 1985 e 2023, com PPP variando entre 30,44% e 47,07% (**Tabela 2**). Os municípios de Candiota, Júlio de Castilhos e Tupanciretã lideraram as perdas de vegetação campestre nativa, excedendo 40% da cobertura remanescente. Esses municípios apresentaram ganhos expressivos em soja, especialmente Júlio de Castilhos e Tupanciretã, onde a expansão agrícola ultrapassou 100.000 ha. Candiota, por sua vez, destacou-se pela combinação do avanço da soja e da silvicultura, resultando na substituição de quase 50% de sua cobertura campestre remanescente. Municípios como Capão do Cipó e Minas do

Leão também registraram perdas expressivas, impulsionadas principalmente pela expansão desproporcional da soja. Em Capão do Cipó, por exemplo, a área convertida para soja corresponde a mais de 50% da perda total de vegetação campestre, indicando uma substituição quase integral da cobertura remanescente. Já Butiá e Arroio dos Ratos sofreram uma pressão dual, com ganhos significativos tanto em silvicultura quanto em soja. Embora a soja predomine como o principal fator de conversão da cobertura campestre remanescente, municípios como Encruzilhada do Sul e Pantano Grande destacaram-se pelo avanço da silvicultura, que superou 80.000 ha no primeiro caso. Em Butiá, a silvicultura responde por mais de 80% da supressão total; dos 27.266 ha de vegetação campestre perdidos, 22.559,9 ha foram convertidos especificamente para silvicultura.

Tabela 1. Comparação das perdas absolutas e percentuais da vegetação campestre nativa no bioma Pampa ao longo de diferentes períodos (38, 30, 20, 10 e 5 anos), considerando dois métodos: (a) remanescente inicial variável e (b) remanescente inicial fixo.

Período (anos)	Perda (ha)	Perda (%)	Classificação (Perda)	Classificação (Perda %)
(a)				
1985–2023	3.506.841	38,55	Muito alta	Muito alta
1993–2023	3.261.854	36,85	Muito alta	Muito alta
2003–2023	2.393.650	29,98	Alta	Alta
2013–2023	1.436.078	20,44	Moderada	Moderada
2018–2023	938.321	14,37	Moderada	Moderada
(b)				
1985–2015	2.179.156	23,96	Alta	Alta
1985–2005	1.356.566	14,91	Moderada	Moderada
1985–1995	428.987	4,72	Baixa	Baixa
1985–1990	115.430.5	1,27	Muito baixa	Muito baixa

A ponderação adotada no cálculo da PPP foi essencial para identificar contrastes espaciais na conversão da vegetação campestre nativa e contextualizar as perdas em relação à escala territorial, evitando que municípios menores fossem subestimados em análises puramente absolutas. A combinação entre PPP e dados absolutos permitiu identificar tanto a intensidade local da conversão (prioritária para políticas de conservação) quanto sua magnitude regional (relevante para planejamento macroeconômico). Por exemplo, municípios de menor extensão, como Quevedos (54.335,9 ha), Minas do Leão (42.433,9 ha) e Jari (85.308 ha), apresentaram PPP elevadas (41,60%, 37,47% e 38,72%, respectivamente), pois a perda absoluta de vegetação campestre, embora numericamente menor, impactou proporcionalmente uma fração significativa de seus territórios. Esse padrão é ainda mais crítico em Arroio dos Ratos (42.579,1 ha), onde uma PPP de 36,32% reflete a substituição de 15.465 ha de vegetação campestre por atividades como silvicultura

(11.035 ha), evidenciando uma pressão desproporcional sobre os ecossistemas campestres. Em contraste, municípios de grande extensão, como Bagé (409.036 ha), Encruzilhada do Sul (334.786,1 ha) e Rio Pardo (205.111,2 ha), registraram perdas absolutas expressivas (127.122 ha, 116.704 ha e 66.298 ha, respectivamente), mas PPP moderadas (31,08%, 34,86% e 32,32%). A ponderação demonstra que, nesses casos, a substituição da vegetação campestre, embora extensa em termos absolutos, ocorre de forma menos intensiva em relação à área total. São Martinho da Serra (66.954,7 ha), por exemplo, com PPP de 34,96% e perda de 23.404 ha, ilustra um cenário intermediário de pressão agrícola concentrada.

Tabela 2. Os 20 municípios com as maiores perdas percentuais ponderadas (PPP) de vegetação campestre nativa e sua relação com a expansão das áreas de cultivo de soja e silvicultura no bioma Pampa. A PPP representa a proporção da vegetação campestre remanescente em 1985 que foi suprimida até 2023, ajustada pela área total do município. Para cada município, também são apresentadas a área territorial (ha) e a perda absoluta (PA) de vegetação campestre.

Município	Área (ha)	PA (ha)	PPP (%)	Soja (ha)	Silvicultura (ha)
Candiota	93.362,8	43.943	47,07	17.955,4	12.214,5
Júlio de Castilhos	192.954,4	86.532	44,85	112.012,4	492,4
Tupanciretã	225.323,4	100.527	44,61	135.052,3	511,6
Quevedos	54.335,9	22.604	41,60	24.227,7	72,0
Pedras Altas	137.398,5	56.936	41,44	23.549,2	13.331,1
Pedro Osório	60.375,7	24.433	40,47	11.798	5.100,7
Jari	85.308	33.028	38,72	33.664,7	36,6
Capão do Cipó	100.779,6	38.805	38,50	52.045,8	66,9
Minas do Leão	42.433,9	15.900	37,47	10.616,2	6.531,6
Arroio dos Ratos	42.579,1	15.465	36,32	3.166,5	11.035
Butiá	75.218,7	27.266	36,25	8.740,4	22.559,9
Aceguá	155.344	54.340	34,98	25.557,7	2.113,7
São Martinho da Serra	66.954,7	23.404	34,96	26.941,2	60,1
Encruzilhada do Sul	334.786,1	11.6704	34,86	25.437,3	84.371,7
Hulha Negra	82.260,8	28.328	34,44	15.170,0	3.370,9
Pantano Grande	84.122,5	28.056	33,35	20.247,0	16.798,5
Rio Pardo	205.111,2	66.298	32,32	61.277,3	12.310,0
Bagé	409.036	127.122	31,08	51.895,7	18.416,3
Boa Vista do Incra	50.411,4	15.592	30,93	31.093,6	55,4
Jóia	123.891,8	37.709	30,44	71.431,7	102,1

Distribuição das perdas percentuais ponderadas por mesorregião

A distribuição espacial da supressão da vegetação campestre no bioma Pampa reflete padrões regionais distintos, influenciados pela dinâmica da expansão agrícola. A mesorregião Sudeste Rio-Grandense (comumente chamada de Serra do Sudeste) concentrou o maior número de municípios (25,9%) entre os 25% com maior PPP, seguida pelas mesorregiões Centro Ocidental Rio-Grandense (20,4%), Metropolitana de Porto Alegre (20,4%) e Sudoeste Rio-Grandense (18,5%; **Figura 5**). As mesorregiões Noroeste Rio-Grandense e Centro Oriental Rio-Grandense tiveram menor representatividade, com 7,4% cada (Ver Tabela 1 no Apêndice 1).

Na mesorregião Sudeste, a conversão da cobertura campestre nativa foi impulsionada pela expansão simultânea da soja e da silvicultura, com áreas expressivas em Canguçu (44.625 ha de soja), Piratini (26.712 ha de soja e 50.136 ha de silvicultura) e Encruzilhada do Sul (84.372 ha de silvicultura). De acordo com um estudo realizado pela Embrapa, a área apta para o cultivo de soja nessa mesorregião corresponde a cerca de 2% do total de áreas aptas para essa cultura no estado²³. Embora a maior parte das terras no Sudeste seja classificada como não recomendada para o cultivo de soja, essa cultura tem se expandido consideravelmente nos últimos anos. Esse crescimento é impulsionado, em parte, pelo preço mais acessível das terras na região, tornando o investimento em soja mais atrativo para os agricultores. A expansão da soja e da silvicultura no Sudeste é extremamente preocupante, especialmente porque essa região abriga uma rica biodiversidade, com grande diversidade de espécies e uma elevada taxa de endemismo de plantas²⁴.

Na mesorregião Centro Ocidental, a soja foi o principal fator de conversão da vegetação campestre nativa, com destaque para sua expansão em Tupanciretã (135.052 ha) e Júlio de Castilhos (112.012 ha). Já na mesorregião Metropolitana de Porto Alegre, a silvicultura desempenhou um papel predominante, com Butiá (22.560 ha) e Dom Feliciano (27.151 ha) figurando entre os principais polos dessa atividade.

Na mesorregião Sudoeste, a soja foi a principal responsável pela conversão da cobertura campestre remanescente, tendo São Gabriel como o principal centro de expansão (103.179 ha), seguido por Bagé (51.896 ha). A silvicultura também teve participação relevante em Bagé, com 18.416 ha.

Na mesorregião Noroeste, a soja desempenhou um papel central na conversão da vegetação campestre, formando grandes maciços em Cruz Alta (81.895,3 ha) e Jóia (71.432 ha).

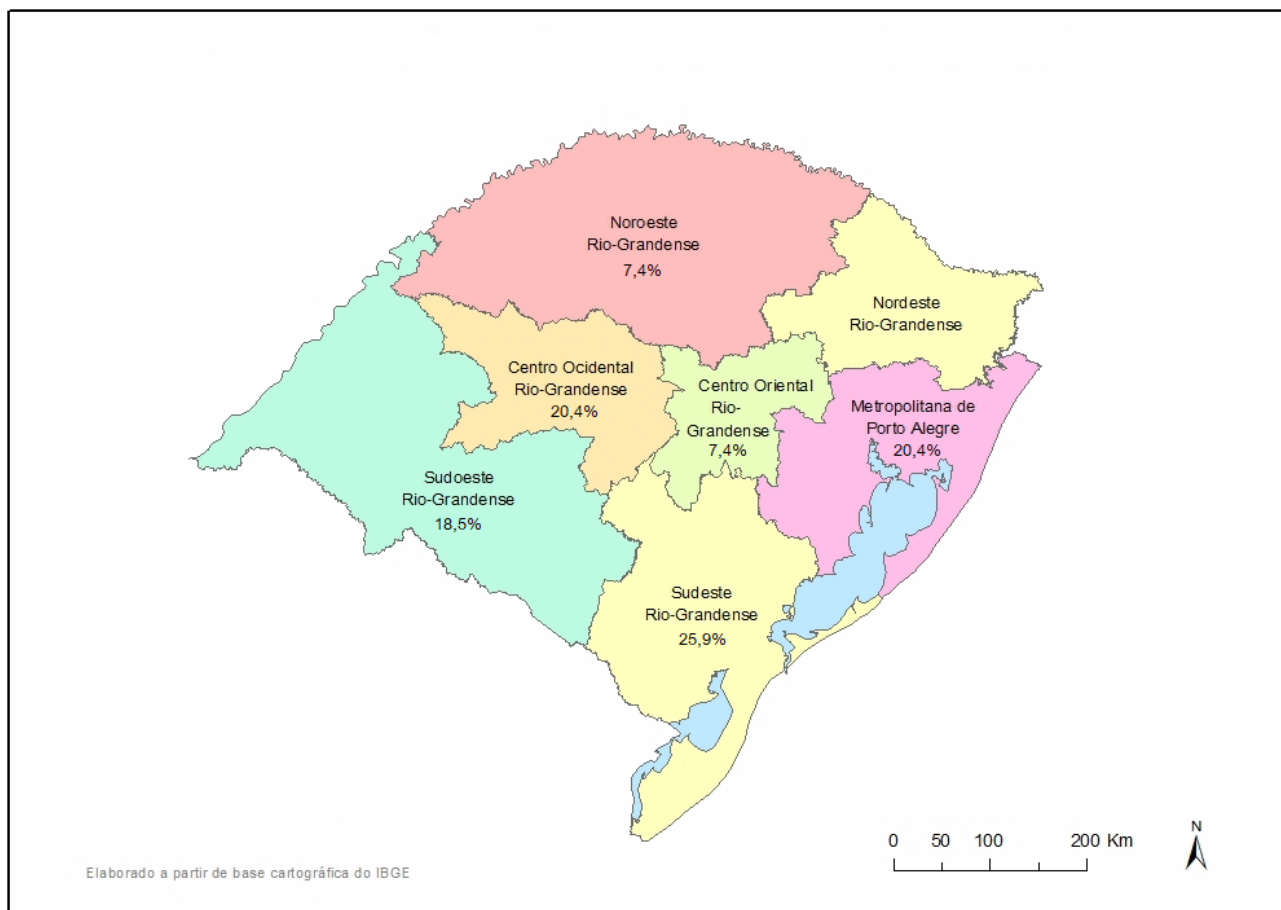


Figura 5. Proporção de municípios com maior perda percentual ponderada (PPP) de vegetação campestre nativa por mesorregião do Rio Grande do Sul. Os valores indicam a participação relativa de cada mesorregião no conjunto dos 25% dos municípios com maiores índices de PPP no bioma Pampa. Mapa adaptado de baixarmapas.com.br.

Expansão agrícola como causa direta da supressão campestre no Pampa

Os resultados do modelo GLM indicaram uma associação positiva e robusta entre a perda de vegetação campestre nativa e a expansão das áreas de cultivo de soja e silvicultura nos 54 municípios (top 25%) que compõem o quartil superior de PPP (**Figura 6**). O coeficiente estimado para o ganho de área de silvicultura foi de 1,21942 ($P < 0,001$), e para o ganho de área de soja, 1,01163 ($P < 0,001$), demonstrando que o avanço dessas atividades está diretamente relacionado à intensificação das perdas de cobertura campestre remanescente. Especificamente, para cada hectare adicional destinado à silvicultura (mantendo constante a expansão da soja), espera-se, em média, uma perda de 1,22 hectares de vegetação campestre. De forma análoga, para cada hectare adicional de soja (com a expansão da silvicultura controlada), há uma perda média de 1,01 hectares

de vegetação campestre. A relação próxima de 1:1 sugere que a expansão dessas culturas ocorre predominantemente em detrimento dos campos nativos do Pampa.

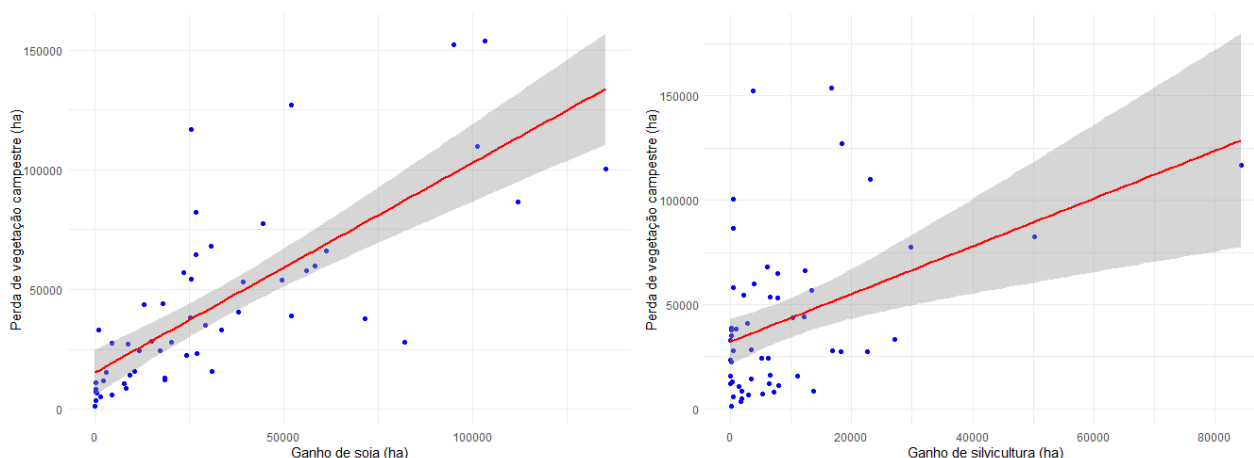
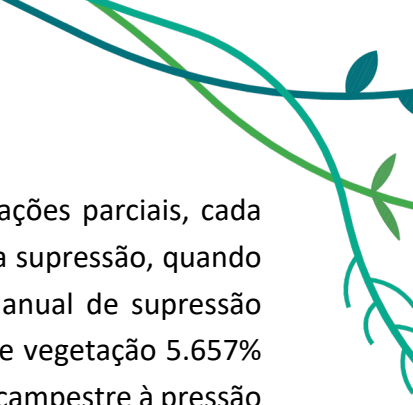


Figura 6. Relação entre a perda de vegetação campestre nativa e a expansão das áreas de cultivo de soja e silvicultura nos municípios do bioma Pampa com as maiores perdas.

O modelo explicou 87,2% da variação total na perda de vegetação campestre (R^2 ajustado = 75,6%), indicando um ajuste robusto e reforçando que a expansão da soja e da silvicultura são preditores consistentes do declínio dos campos nativos nesse contexto. Esses resultados destacam o impacto crítico das mudanças no uso agrícola do solo na substituição da vegetação única do bioma Pampa, com implicações diretas para estratégias de conservação. Estudos anteriores também alertaram que a conversão de campos nativos em áreas agrícolas, principalmente para a soja e a silvicultura, é a principal ameaça à integridade ecológica do Pampa^{25,26,27}. Alguns trabalhos destacam que as mudanças no uso da terra têm afetado atividades tradicionais, como a pecuária extensiva em campos nativos, atividade que desempenha papel fundamental na conservação da vegetação campestre nativa^{28,29}.

Modelos preditivos para cenários futuros de perda do patrimônio campestre

A análise de regressão de Prais-Winsten evidenciou que a taxa de incremento percentual de área agrícola (agropecuária) e a tendência temporal estão significativamente associadas à taxa de incremento percentual de supressão da vegetação campestre (**Figura 6**). O impacto da expansão agrícola é substancialmente maior que o efeito temporal, com coeficientes de 0,792 (erro padrão = 0,064; $t = 12,28$; $P < 0,001$) para a agropecuária e 0,0004 (erro padrão = 0,00006; $t = 6,40$; $P < 0,001$) para o tempo. Considerando a escala decimal das variáveis, onde 1 unidade equivale a 100% de variação, observamos que um aumento completo (100%) na taxa de incremento agrícola



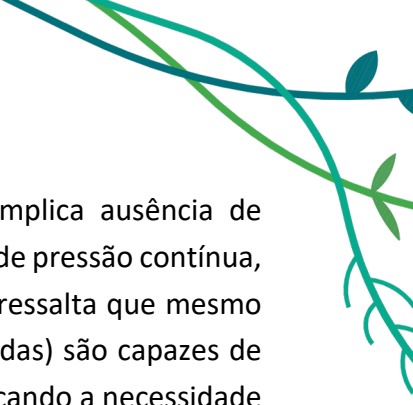
corresponde a um crescimento de 79,2% na supressão campestre. Para variações parciais, cada incremento de 1% (0,01) na expansão agrícola resulta em 7,9% de aumento na supressão, quando o efeito temporal é mantido constante. Comparando-se com a taxa média anual de supressão (0,014), um incremento total (100%) na área agrícola equivale a uma perda de vegetação 5.657% superior à média histórica, indicando uma sensibilidade extrema da vegetação campestre à pressão agropecuária.

O efeito temporal, embora menos expressivo, também revelou uma tendência significativa: o coeficiente de 0,0004 indica que a taxa de supressão aumenta aproximadamente 4% ao ano independentemente da expansão agrícola. Em relação à média anual de supressão (0,014), esse incremento corresponde a um aumento médio de 2,8% ao ano na taxa de perda.

O modelo demonstrou elevada capacidade explicativa, com um R^2 ajustado de 0,8756, indicando que aproximadamente 88% da variação total na taxa de incremento de supressão foi capturada ao longo do período estudado. A robustez do ajuste foi reforçada pelo valor do teste de Durbin-Watson ajustado (2,125), que confirmou a ausência de autocorrelação residual significativa após a correção AR(1), validando a adequação do modelo para análise de séries temporais.

Os resultados do modelo de regressão de Prais-Winsten indicaram que o tempo não apresentou associação estatisticamente significativa com a taxa de incremento percentual de área agrícola (**Figura 6**) reforçando a estacionariedade da série temporal (coeficiente = 0,00024; erro padrão = 0,00023; $t = 1,05$; $P = 0,303$). Especificamente, para cada ano adicional, observamos um aumento médio de 0,0002443 unidades (equivalente a 0,024%) na área agrícola. Em termos relativos, esse valor corresponde a um incremento estimado de ~1,70% na área agropecuária em relação à média histórica, demonstrando que a expansão anual não segue uma tendência temporal definida. A confirmação da estacionariedade foi validada pelo teste de Dickey-Fuller aumentado (valor = -3,7156; lag = 1; $P = 0,03858$), que rejeitou a presença de raiz unitária na série, indicando que a taxa de incremento agrícola não exhibe padrões de crescimento ou declínio significativos ao longo do período analisado.

A ausência de tendência temporal sugere que o aumento anual da área agrícola ocorre de forma não sistemática e imprevisível, sem padrões lineares ou exponenciais claros. No entanto, conforme demonstrado em análises anteriores, o impacto acumulativo da agropecuária na supressão de vegetação campestre permanece altamente significativo, mesmo sem uma trajetória temporal linear definida. Por essa razão, optamos por incluir o coeficiente de aumento anual da área agrícola nos modelos mistos 6 e 7, incorporando maior realismo à análise. Essa decisão reflete a dinâmica de que pressões constantes (mesmo sem tendência clara) podem gerar efeitos cumulativos críticos, como a degradação gradual da vegetação campestre nativa.



Em termos ecológicos, a estacionariedade da série temporal não implica ausência de impacto, mas sim que a perda de vegetação campestre está sujeita a um efeito de pressão contínua, independentemente de flutuações anuais na expansão agrícola. Essa relação ressalta que mesmo variações modestas e não direcionais na área agropecuária (como as observadas) são capazes de induzir perdas significativas de vegetação campestre ao longo do tempo, reforçando a necessidade de monitoramento constante e políticas adaptativas para mitigar danos cumulativos.

Os modelos preditivos revelaram diferenças substanciais nas estimativas de tempo para a perda completa da vegetação campestre remanescente em áreas privadas (~85% da área total do bioma), dependendo das abordagens metodológicas adotadas (**Figura 7**). Os modelos determinísticos (1 e 3), que não incorporam variabilidade, indicaram cenários pessimistas com períodos de extinção mais curtos e previsíveis. Em contraste, o modelo 2 projetou um tempo significativamente maior (163 anos), ao assumir que a taxa de perda diminui conforme a vegetação campestre se torna escassa, configurando um cenário relativamente otimista. O modelo estocástico 4, que integra incertezas e flutuações naturais, apresentou a projeção mais longa (313 anos), sugerindo um horizonte de degradação menos previsível e potencialmente mais brando. Já os modelos mistos (5, 6 e 7), que combinam tendências históricas de supressão e expansão agrícola com elementos estocásticos, produziram estimativas intermediárias e mais realistas. O modelo misto 5 estimou 83 anos para a vegetação atingir o limite mínimo observado em unidades de conservação, baseado nas taxas históricas de supressão. Com a inclusão da taxa de incremento agrícola, o modelo misto 6 reduziu essa projeção para 73 anos, evidenciando que a expansão agropecuária acelera a perda de vegetação. O modelo misto 7, o mais complexo ao integrar flutuações estocásticas nas taxas de supressão e incremento agrícola, previu um cenário ainda mais crítico: 64 anos até a extinção completa da vegetação campestre em áreas privadas.

Esses resultados destacam dois aspectos centrais: (1) A inclusão de incertezas e efeitos agrícolas não apenas encurta as projeções de tempo, mas também reflete cenários mais conservadores e alinhados à realidade, onde pressões antrópicas e variabilidade ambiental interagem. (2) O impacto da agropecuária na vegetação campestre remanescente não está necessariamente vinculado a uma tendência ascendente contínua, mas sim à presença constante e à intensidade acumulada das atividades agrícolas, mesmo que irregulares.

Em termos práticos, as projeções mais realistas (Modelos 6 e 7) indicam que a expansão agrícola, mesmo ocorrendo de forma não linear, exerce uma pressão crítica sobre os remanescentes campestres, acelerando sua degradação em escalas temporais relevantes. Esse cenário evidencia a necessidade urgente de políticas públicas que reduzam a “conversão indiscriminada” dos campos naturais do Pampa, aliadas a estratégias adaptativas de gestão territorial, como o zoneamento ecológico-econômico (para regulamentar o uso do solo) e incentivos governamentais à adoção de sistemas produtivos de baixo impacto. Em grande parte, a conversão dos campos do Pampa tem

ocorrido ilegalmente, sem a devida autorização prévia do órgão competente³⁰, apesar da alta biodiversidade desses ecossistemas e da sua importância em termos de serviços ecossistêmicos^{31,32}. O preço da soja no mercado internacional, a falta de políticas e incentivos para a pecuária sustentável e a fragilidade da cadeia produtiva da carne no Rio Grande do Sul têm contribuído decisivamente para a perda acelerada dos campos remanescentes do Pampa^{33,34,35}.

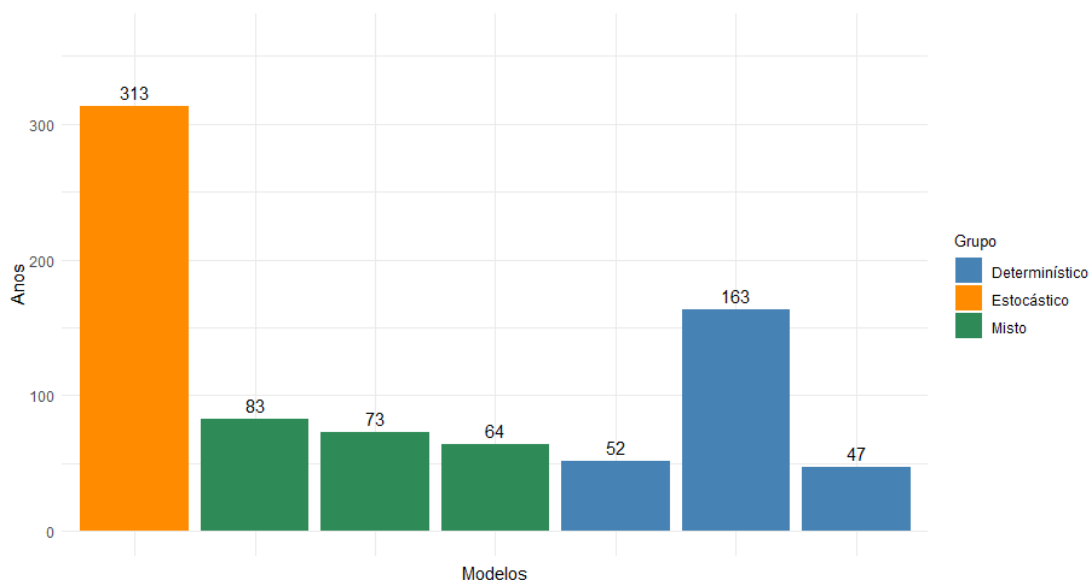


Figura 7. Tempo estimado para a eliminação da vegetação campestre remanescente em áreas privadas do bioma Pampa, de acordo com modelos determinísticos, estocásticos e mistos, considerando a expansão agrícola contínua e a ausência de medidas de conservação.

A metodologia apresentada neste estudo pode ser aplicada na análise de cenários futuros para diferentes tipos de ecossistemas terrestres, desde que haja disponibilidade de séries temporais de imagens de satélite classificadas quanto ao uso e à cobertura do solo. Na América do Sul, a iniciativa MapBiomas já disponibiliza esse tipo de mapeamento para os territórios de dez países: Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Equador, Paraguai, Peru, Uruguai e Venezuela. Isso viabiliza a análise prospectiva de diversos ecossistemas, especialmente daqueles sob maior pressão de conversão para usos alternativos do solo, como ocorre, no Brasil, com o Cerrado, a Amazônia e os Campos de Altitude da Mata Atlântica. Resultados obtidos por meio da modelagem de cenários futuros de uso e cobertura do solo possuem elevado potencial para subsidiar decisões de gestão territorial, elaboração de legislações e políticas públicas voltadas a temas como ordenamento territorial, definição de áreas prioritárias para conservação e restauração, fiscalização ambiental, financiamento de atividades produtivas, extensão rural, entre outros.

Considerações finais

Os resultados indicam uma clara aceleração na supressão da vegetação campestre nativa no bioma Pampa, especialmente nas últimas duas décadas, com picos críticos nos períodos mais recentes (2013–2023 e 2018–2023). A perda de quase 1 milhão de hectares em apenas cinco anos (188 mil ha/ano) evidencia a intensidade do processo, ressaltando a crescente pressão agropecuária sobre esses ecossistemas. As fortes associações entre a perda de remanescentes campestres e a expansão das áreas de cultivo de soja e silvicultura destacam o papel central da agropecuária na degradação do bioma, demandando regulamentações rigorosas e a priorização de áreas críticas para conservação, sob risco de um colapso irreversível.

Nossas projeções indicam que, sem ações imediatas, os campos nativos em áreas privadas poderão desaparecer antes do final deste século. Entretanto, variações nas taxas de supressão, impulsionadas por fatores como mudanças climáticas, políticas públicas e intensificação agropecuária, podem acelerar esse processo se as tendências atuais persistirem. A situação é ainda mais preocupante considerando que muitos remanescentes já estão degradados pela invasão de espécies exóticas, principalmente o capim-annoni (*Eragrostis plana*)³⁶. Além disso, a baixa cobertura de áreas protegidas (a menor entre os biomas brasileiros) e lacunas no regramento estadual para controlar a conversão dos campos nativos ampliam sua vulnerabilidade e comprometem sua proteção efetiva³⁷. O recente acordo entre o governo do RS e o MPE-RS revogou dispositivos que classificavam campos sob manejo pastoril como áreas rurais consolidadas e eliminou gargalos institucionais. Contudo, a efetividade das medidas de conservação e prevenção da supressão ilegal ainda depende de regulamentação estadual, que segue indefinida em aspectos fundamentais, como percentuais mínimos de vegetação remanescente por ecorregião e mecanismos de compensação ambiental, incluindo critérios de equivalência ecológica e definição de áreas prioritárias para restauração. O principal avanço reside na obrigatoriedade da compensação ambiental pela supressão de campos nativos, corrigindo uma lacuna histórica na aplicação da legislação ambiental.

Apesar dos desafios, há oportunidades para conciliar a produção agropecuária e a conservação no Pampa. A RL, agora plenamente exigível nos campos nativos devido ao alinhamento do acordo com a LPVN, desempenha um papel central na manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais à pecuária sustentável, como ciclagem de nutrientes e regulação hídrica. Além disso, a criação de Unidades de Conservação (UCs) de uso sustentável, como Áreas de Proteção Ambiental (APAs), Reservas de Desenvolvimento Sustentável (RDSs) e Refúgios de Vida Silvestre (REVISs), pode favorecer a integração entre conservação da biodiversidade campestre, manejo pastoril sustentável e produção de carne de alta qualidade.

Agradecimentos

Agradecemos ao Prof. Valério D. Pillar e aos dois revisores anônimos pelas críticas, sugestões e comentários que contribuíram para o aprimoramento de uma versão anterior deste manuscrito.

Referências

- 1- Projeto MapBiomias. 2024. Coleção [9] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/estatisticas/>
- 2- Baeza, S., Paruelo, J.M. 2020. Land use/land cover change (2000–2014) in the Rio de la Plata Grasslands: An analysis based on MODIS NDVI time series. Remote Sensing 12: 381. <http://doi:10.3390/rs12030381>
- 3- Gallego, F. 2024. Río de la Plata Grasslands: How Did Land-Cover and Ecosystem Functioning Change in the Twenty-First Century?. In Overbeck, G.E. et al. (eds.): South Brazilian Grasslands. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42580-6_18
- 4- Projeto MapBiomias. 2024. Coleção 4 do MapBiomias Pampa Trinacional: série anual de mapas de cobertura e uso da terra. Disponível em: <https://pampa.mapbiomas.org/>
- 5- Modernel, P. et al. 2016. Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. Environmental Research Letters. 11: 113002.
- 6- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2019). Mapa de Biomas do Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>
- 7- Brasil. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e nº 7.754, de 14 de abril de 1989; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm
- 8- Rio Grande do Sul. Decreto nº 52.431, de 23 de junho de 2015 - Dispõe sobre a implementação do Cadastro Ambiental Rural e define conceitos e procedimentos para a aplicação da Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, no Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://sincage.sefaz.rs.gov.br/documento-completo/0d078d5a-352e-4bcf-87dd-16b2db08f82c>
- 9- Rio Grande do Sul. Lei nº 15.434, de 9 de janeiro de 2020 - Institui o Código Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://sincage.sefaz.rs.gov.br/documento-completo/e9855af6-bd2e-4276-8a4d-5e8fde8a2ac5>
- 10- Overbeck, G.E. et al. 2023. A restauração ecológica dos campos do bioma Pampa: Avanços e desafios na Década da Restauração de Ecossistemas. Bio Diverso 3: 115-139. <https://seer.ufrgs.br/index.php/biodiverso/article/view/129069>
- 11- BRASIL. Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativa à proteção do meio ambiente; e dá outras providências.

- Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 dez. 2011. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LCP/Lcp140.htm
- 12- Hasenack, H. et al. 2024. Pampa – Appendix, Collection 9, Version 1. disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/08/Pampa-Appendix-ATBD-Collection-9_2024.pdf
- 13- Overbeck, G.E., Pillar, V.D. 2024. Forest-biased terminology does not help to include open ecosystems in conservation policies. *Perspectives in Ecology and Conservation*. 22:328-330. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2024.11.001>
- 14- Agresti, A. 2015. *Foundations of Linear and Generalized Linear Models*. Wiley.
- 15- Faraway, J.J. 2016. *Extending the Linear Model with R: Generalized Linear, Mixed Effects and Nonparametric Regression Models*. CRC Press.
- 16- Wood, S.N. 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R* (2nd ed.). CRC Press.
- 17- Wood, S. 2015. Package mgcv. R Package Version 1.9-1. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/mgcv/mgcv.pdf> (Acessado em 30 de Outubro, 2024)
- 18- Prais, S.J., Winsten, C.B. 1954. Trend Estimators and Serial Correlation. Cowles Commission Discussion Paper, 383 (Chicago). Disponível em: <https://cowles.yale.edu/sites/default/files/2023-05/s-0383.pdf>
- 19- Shumway, R.H., Stoffer, D.S. 2017. *Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples* (4th ed.). Springer.
- 20- Mohr, F.X. 2024. Package 'prais'. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/prais/prais.pdf>. (Acessado em 27 de Outubro, 2024)
- 21- Pielou, E.C. 1977. *Mathematical Ecology*. John Wiley & Sons.
- 22- Murray, J.D. 2002. *Mathematical Biology: I. An Introduction* (3rd ed.). Springer.
- 23- EMBRAPA Solos. 2000. Zoneamento pedoclimático do Rio Grande do Sul para a cultura da soja. Série Documentos, n. 25. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/337682/2/Soja-RS.pdf>.
- 24- Boldrini, I.L. 2009. A flora dos Campos do Rio Grande do Sul. In: Pillar, V.D., Müller, S.C., Castilhos, Z.M.S., Jacques, A.V.A. (Orgs.). *Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade*. Brasília: MMA, 2009. p. 63-77.
- 25- Kuplich, T.M., Capoane, V., Costa, L.F.F. 2018. O avanço da soja no bioma Pampa. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, n. 31, p. 83-100.
- 26- Rede Campos Sulinos. 2020. A Agonia do Pampa: um panorama atual sobre a supressão da vegetação nativa campestre. Disponível em: http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br/arquivos/Agonia_do_Pampa.pdf
- 27- Silveira, V.C.P., González, J.A., Fonseca, E.L. 2017. Land use changes after the period commodities rising price in the Rio Grande do Sul State, Brazil. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.47: 04, e20160647.
- 28- Moreira, J.G., Conterato, M.A., Matte, A. 2019. Transformações produtivas e mudanças no uso da terra no Pampa brasileiro: influências do avanço da soja na bovinocultura de corte. *Campo-Território: revista de geografia agrária*, v.14, n.33, p. 179-207.
- 29- Oliveira, J.C.P. 2021. Revisão sobre o ambiente e a produção agropecuária no bioma Pampa do Brasil. Embrapa Pecuária Sul, Bagé (Documentos / Embrapa Pecuária Sul, ISSN 1982-5390; 167), 41p.

- 
- 30- De Mattos, C.N.A., Luft, E.F., Bonfim, D.F. 2024. Pressões sobre o Bioma Pampa: Uma Análise da Supressão da Vegetação nativa com e sem Autorização (2018-2021). IX Seminário Anual do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais (PPGDTSA) – Desenvolvimento e Território: Olhares sobre o Pampa.
- 31- Andrade, B.O., Dröse, W., Aguiar, C.A. 2023. 12,500+ and counting: biodiversity of the Brazilian Pampa. *Frontiers of Biogeography* 5.2, e59288. <https://doi.org/10.21425/F5FBG59288>
- 32- Krob, A., Overbeck, G.E., Mahler, J.F.K. 2021. Contribution of southern Brazil to the climate and biodiversity conservation agenda. *Bio Diverso* 1: 132-144. <https://seer.ufrgs.br/index.php/biodiverso/article/view/120228>
- 33- Vélez-Martin, E. et al. 2015. Conversão e Fragmentação. In Pillar, V.P.P., La, O. (eds.): *Os Campos do Sul*. 1. ed. Porto Alegre: Rede Campos Sulinos. cap. 12, p. 123-129.
- 34- Capoane, V., Kuplich, T.M. 2018. Expansão da agricultura no bioma Pampa. In 8º Reunião de Estudos Ambientais (REA), Porto Alegre (RS), p. 1-9.
- 35- Baeza, S. et al. 2022. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomias Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 28, p. 100834. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>.
- 36- Zabala-Pardo, D., Pinto-Lamego, F. 2024. Biology of the invasive species *Eragrostis plana* in Southern Brazil: What have we learned and how may this help us manage it? *Weed Research*. 2024;1–12. DOI: 10.1111/wre.12615.
- 37- Overbeck et al. 2024. A restauração ecológica dos campos do bioma Pampa: Avanços e desafios na Década da Restauração de Ecossistemas. *Revista Bio Diverso*. Vol. 3(Art. e2), p.115-139.