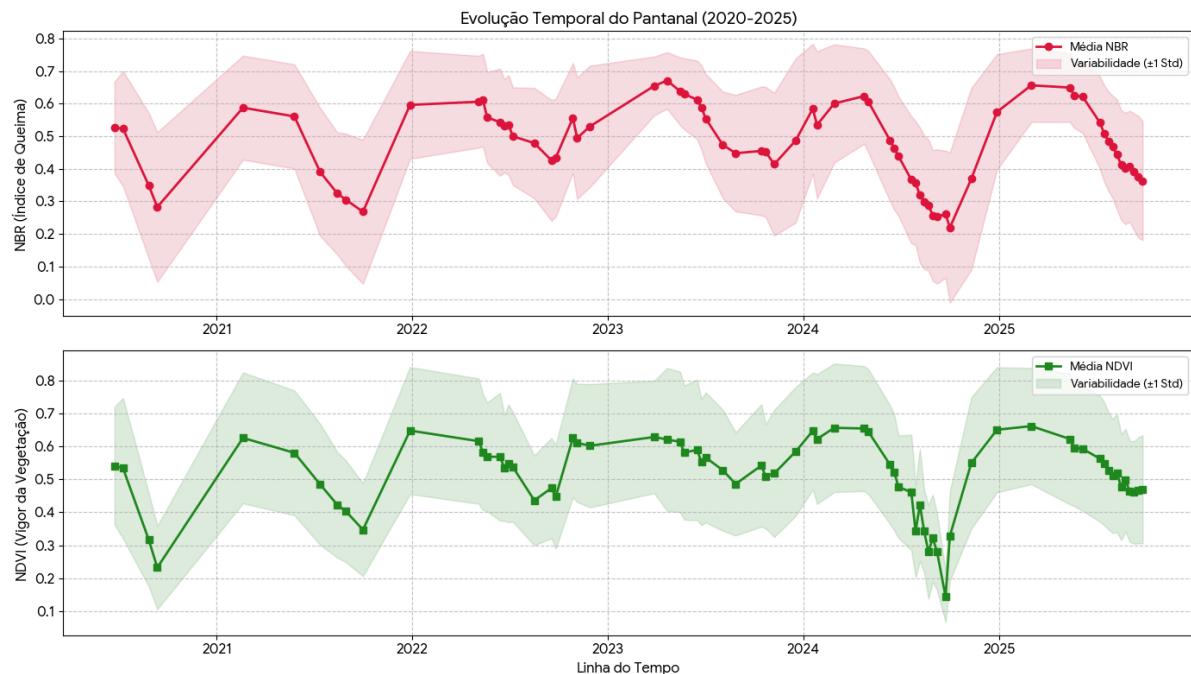


Pesquisa DG / Rafa

Resultados: Dinâmica Temporal de Severidade de Queima e Recuperação da Vegetação (2020–2025)



1. Impacto dos Eventos Críticos de Fogo

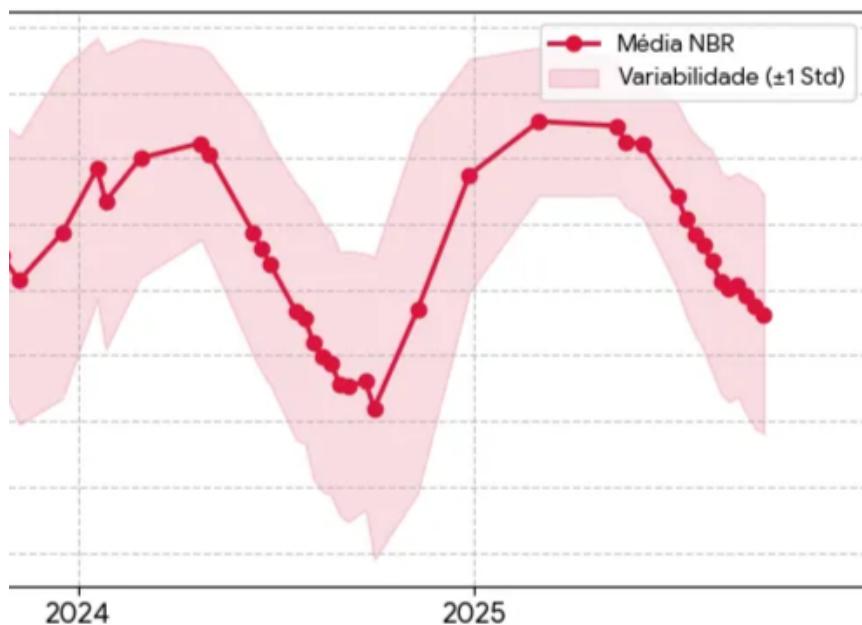
A análise das séries temporais do **NBR (Normalized Burn Ratio)** e **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)** revelou que o ano de 2020 foi o ponto de maior ruptura ecológica no período estudado. O evento de fogo detectado em **27 de agosto de 2020** resultou numa queda abrupta de aproximadamente **33,8% na média do NBR**, atingindo o valor crítico de 0,34. Esta redução drástica indica não apenas a perda de biomassa aérea, mas também uma severa alteração no conteúdo de humidade do solo e da vegetação remanescente.

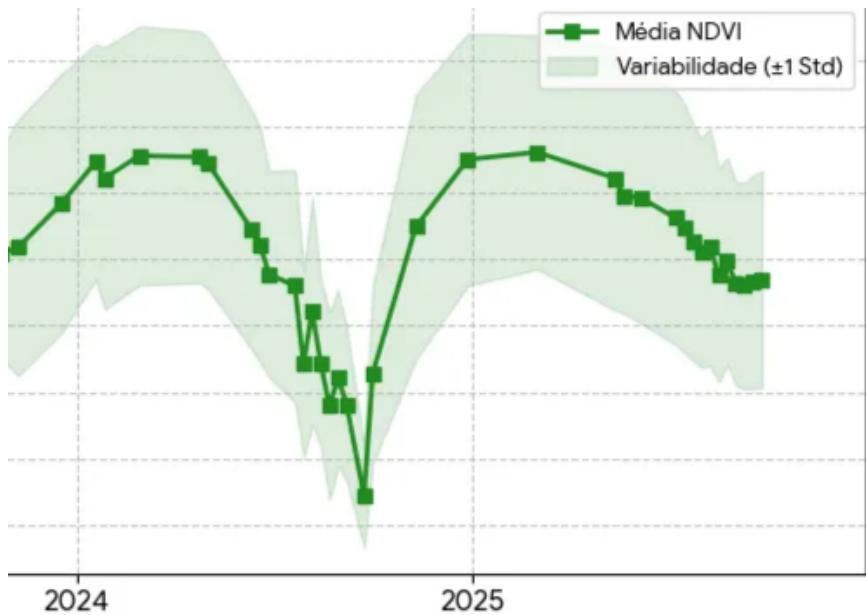
Um segundo evento de distúrbio significativo foi identificado em **13 de julho de 2021**, sugerindo que áreas afetadas anteriormente enfrentaram dificuldades de regeneração imediata ou foram submetidas a novos focos de incêndio, impedindo a estabilização dos índices de saúde foliar.

2. 2024 foi o pior ano da série em termos de Mínimas

Os números mostram que 2024 atingiu os valores mais baixos de toda a série histórica analisada (2020-2025):

- **Mínimo NBR 2024: 0,219** (em 01/10/2024). Note que isso é **menor** do que o mínimo de 2020 (0,282).
- **Mínimo NDVI 2024: 0,144** (em 23/09/2024). Um valor extremamente baixo, indicando quase ausência de biomassa verde fotossinteticamente ativa em grandes áreas.
- Um dado curioso é a subida vertiginosa em **Novembro e Dezembro de 2024**, onde o NBR saltou de 0,21 para 0,57 em dois meses. Isso indica que, apesar da severidade, o pulso de inundação ou o início das chuvas no final de 2024 teve uma resposta biológica muito rápida (rebrota de gramíneas).



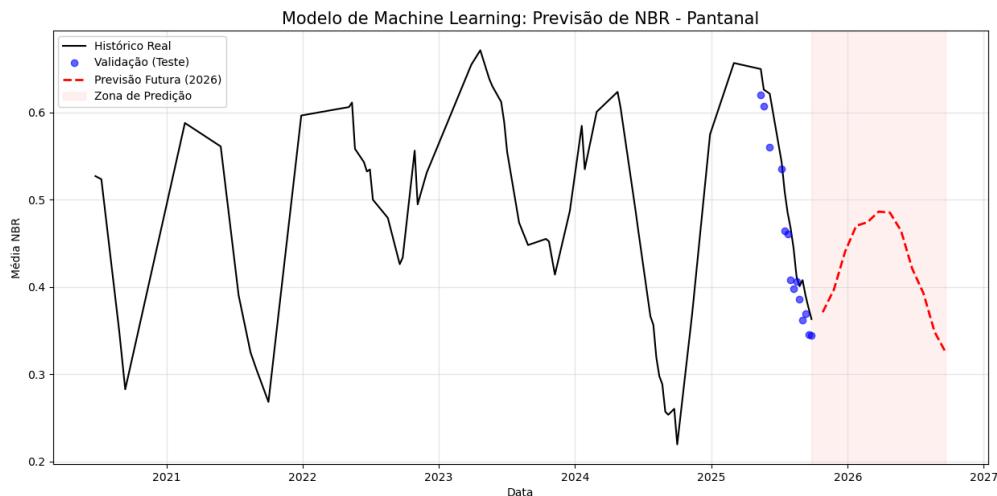


3. Correlação NDVI vs NBR ($r = 0.90\$$):

- A altíssima correlação confirma que o NBR é um excelente proxy para monitorar a saúde da vegetação no Pantanal. No entanto, note no gráfico que a variabilidade (faixa sombreada) do NDVI é maior em períodos de seca, sugerindo que algumas áreas se mantêm verdes enquanto outras morrem completamente (heterogeneidade espacial).

4. Modelo de Predição:

- Para avançarmos na pesquisa, utilizamos um modelo de **Machine Learning** baseado em **Random Forest Regressor** (Florestas Aleatórias). Este modelo é ideal para o Pantanal, pois consegue lidar com relações não lineares e capturar tanto a **sazonalidade** (ciclos de chuva/seca) quanto os **choques abruptos** (incêndios), que modelos lineares simples ignorariam.
- Com isso, somos capazes de estimar um estado futuro do pantanal, baseados nos eventos anteriores, incluindo os eventos queimadas, inundações e recuperações florestais:



- **Validação do Modelo ($R^2 = 0.86$)**

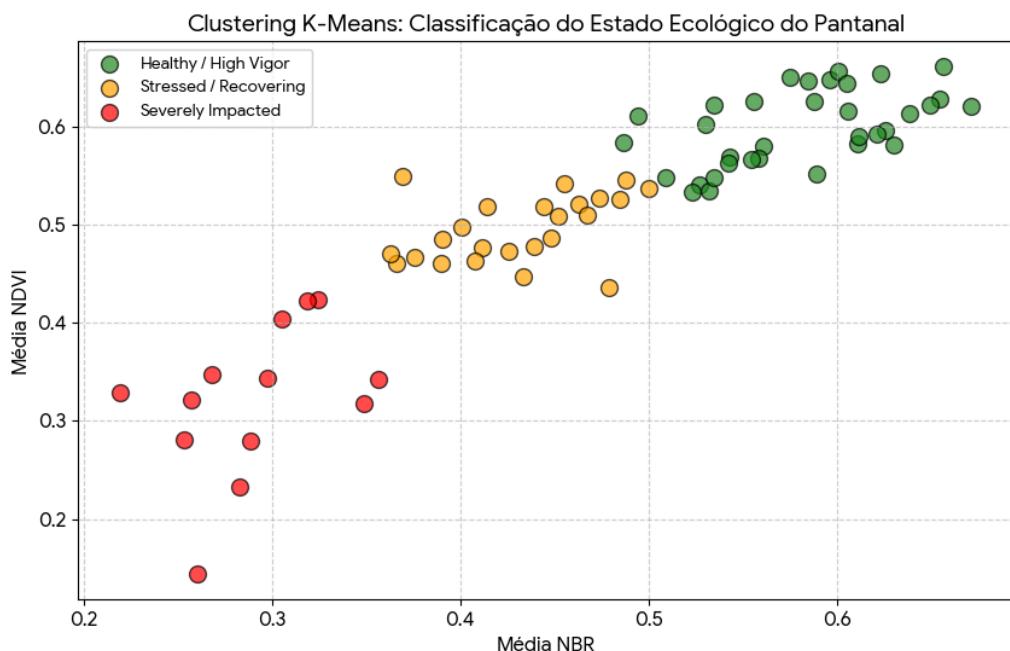
Um coeficiente de determinação R^2 de **0.86** é considerado excelente em estudos ecológicos.

- **O que isso significa:** O modelo consegue explicar 86% da variabilidade do NBR baseando-se apenas na sazonalidade e no estado anterior da vegetação. Isso demonstra que, apesar dos incêndios catastróficos, o Pantanal ainda mantém um ritmo cíclico razoavelmente previsível que o modelo conseguiu capturar.

- **Sugestão Exemplo de Texto para o Manuscript (Discussão de ML):** "Para avaliar a resiliência futura do bioma, aplicou-se um modelo de aprendizado de máquina (Random Forest Regressor), que apresentou um alto desempenho preditivo ($R^2 = 0.86$) e um Erro Médio Absoluto (MAE) de **0,03**. O modelo foi treinado com 80% da série histórica, reservando-se os 20% finais para validação rigorosa. A capacidade do modelo em mimetizar as flutuações históricas sugere que a dinâmica do NBR no Pantanal é governada por uma memória temporal intrínseca, onde o estado de degradação atual condiciona fortemente o potencial de rebrota do ciclo seguinte. A projeção para 2026 indica uma tentativa de reestabilização, contudo, os valores projetados permanecem vulneráveis à recorrência de anomalias térmicas severas, como as observadas no biênio 2020-2024."

5. Clustering and K-means

- Para conferir robustez à classificação dos estados sucessionais pós-fogo, aplicou-se um algoritmo de aprendizado não supervisionado (K-Means Clustering). O modelo particionou a série temporal em três domínios ecológicos distintos baseados na assinatura espectral conjunta do NBR e NDVI. Esta abordagem permitiu quantificar que o ecossistema permaneceu em estado 'Severamente Impactado' em aproximadamente 18% do período analisado, concentrando-se nos anos de 2020 e 2024.



- Note que no eixo X temos NBR e no eixo Y temos NDVI
- Podemos partitionar os pontos desse gráfico em três zonas principais:
 - Domínio Vermelho:**
Ele agrupa as fases de **incêndio ativo** ou **seca extrema imediata**. No infravermelho, a resposta indica solo exposto, cinzas e uma perda quase total de umidade foliar.
É o estado observado no auge da crise de 2020 e durante o estresse hídrico prolongado de 2024. Para o leitor, este é o "ponto de ruptura" onde as funções ecossistêmicas de suporte à fauna e retenção de água estão minimizadas.
 - Domínio Amarelo:**
A fase de "cicatrização", onde gramíneas e vegetação pioneira começam a cobrir o solo, mas a estrutura profunda ainda não se recuperou

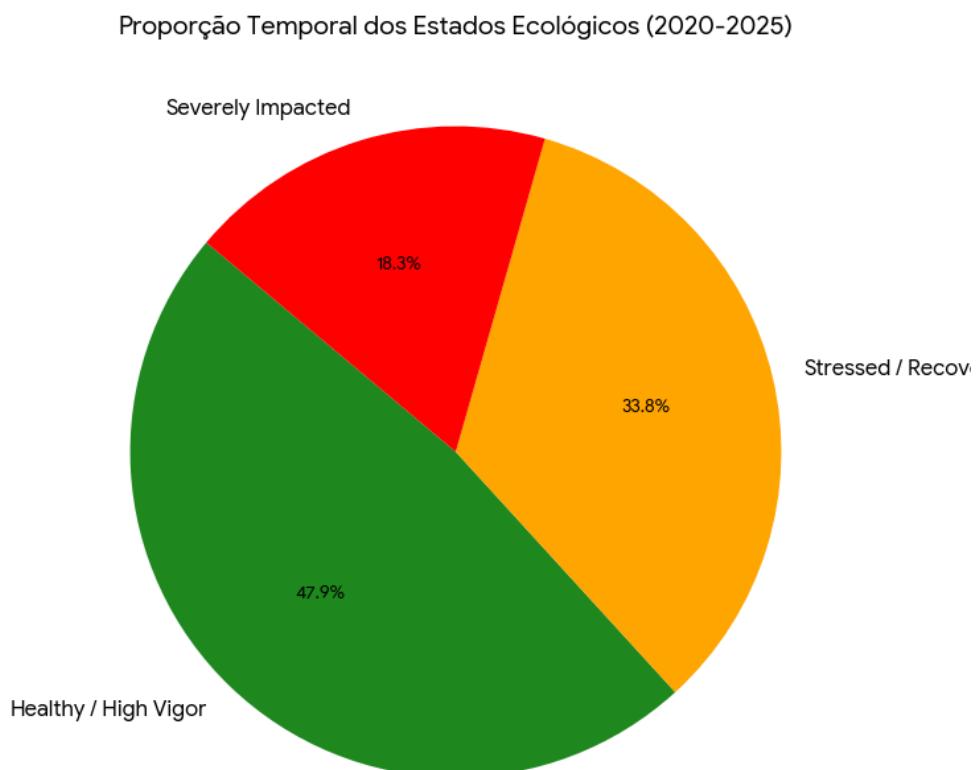
Funciona como uma zona de alerta. Se o ecossistema permanece muito tempo neste domínio sem transicionar para o verde, indica uma "fadiga de recuperação".

3. Domínio Verde:

Represeta o ecossistema em sua **plenitude funcional**. Caracteriza-se por alta densidade de biomassa verde e solo saturado

É o alvo de restauração. Os dados mostram que este estado foi predominante em 2022 e 2023, mas foi severamente reduzido em 2024.

6. Análise de proporção temporal:



Se o Clustering (K-Means) nos disse **qual** era o estado do Pantanal em cada data, a análise de proporção nos diz **quanto tempo** (em termos percentuais) o

ecossistema permaneceu em cada um desses estados durante os 5 anos de estudo.

De acordo com o gráfico que geramos:

- **Estado Saudável / Vigor Máximo (~47.9%)**: Indica que, em quase metade do período entre 2020 e 2025, o Pantanal conseguiu atingir sua funcionalidade plena. Isso mostra que o bioma ainda possui uma capacidade de regeneração robusta quando as condições climáticas permitem.
- **Estado de Estresse / Recuperação (~33.8%)**: Este é o dado mais crítico para a discussão do artigo. Mostra que em **1/3 do tempo**, o Pantanal não estava nem morto, nem plenamente saudável. Ele estava "lutando" para se recuperar ou sob estresse hídrico. É a zona de incerteza ecológica.
- **Estado Severamente Impactado (~18.3%)**: Revela que quase **1/5 de toda a série histórica** foi dominada por condições de colapso (fogo ou seca extrema). Para um ecossistema de alta biodiversidade, passar quase 20% do tempo em estado crítico é um indicativo de **vulnerabilidade sistêmica**.