

# Modelo de Resposta Funcional da Vegetação Campestre ao Distúrbio

Formulação Conceitual, Matemática e Implicações Computacionais

José Pedro Trindade

18 de dezembro de 2025

## 1 Contexto Ecológico e Motivação

A persistência de ecossistemas campestres não pode ser compreendida a partir de trajetórias sucessionais lineares orientadas à estabilização estrutural máxima. Diferentemente de sistemas florestais, campos naturais dependem de regimes recorrentes de distúrbio para manter sua identidade funcional, estrutura aberta e diversidade.

No contexto do modelo de Vegetação Campestre do *SisterApp*, o distúrbio não é tratado como exceção ou ruído, mas como um **fator estruturante** do sistema, responsável por modular a dominância funcional entre o Estrato Inferior (EI) e o Estrato Superior (ES).

## 2 Definição Operacional do Distúrbio

O distúrbio ( $D$ ) é definido como uma variável escalar composta, que integra três dimensões fundamentais:

- **Magnitude** ( $M$ ): intensidade do evento (ex.: pressão de pastejo, severidade do fogo);
- **Frequência** ( $F$ ): recorrência temporal dos eventos;
- **Escala Espacial** ( $E$ ): proporção da paisagem afetada.

Para garantir coerência ecológica e evitar efeitos espúrios, o distúrbio é operacionalizado como:

$$D = M \cdot F \cdot E$$

Essa formulação assegura que eventos de frequência nula ou escala desprezível não produzem resposta funcional no sistema.

### 3 Resposta Funcional do Estrato Inferior (EI)

O Estrato Inferior (EI), composto predominantemente por gramíneas e herbáceas, apresenta elevada tolerância e resposta positiva ao distúrbio. Contudo, essa resposta não é ilimitada, exibindo retornos decrescentes à medida que a intensidade do distúrbio aumenta.

Essa dinâmica é representada por uma **função logarítmica positiva**:

$$R_{EI}(D) = \log(1 + \alpha D)$$

onde  $\alpha$  representa o coeficiente de sensibilidade ecológica do EI ao distúrbio.

Ecologicamente, essa formulação expressa que:

- distúrbios de baixa intensidade promovem forte resposta funcional do EI;
- distúrbios intermediários mantêm sua persistência e dominância;
- distúrbios elevados resultam em saturação funcional, sem ganhos proporcionais adicionais.

No modelo,  $R_{EI}$  não atua como incremento direto de biomassa. Trata-se de um **modulador funcional**, utilizado para ajustar:

- a capacidade de suporte local ( $K_{EI}$ );
- a probabilidade de persistência;
- a velocidade de recolonização pós-distúrbio.

Para garantir estabilidade numérica e coerência ontológica, os valores derivados de  $R_{EI}$  são restringidos ao intervalo funcional esperado por meio de normalização ou saturação na implementação computacional.

### 4 Resposta Funcional do Estrato Superior (ES)

O Estrato Superior (ES), associado à biomassa lenhosa de baixo porte, responde negativamente ao aumento da intensidade do distúrbio. Sua persistência depende de regimes de baixa perturbação, sendo progressivamente suprimida sob maior pressão ecológica.

Essa resposta é modelada por uma **função exponencial negativa**:

$$R_{ES}(D) = e^{-\beta D}$$

onde  $\beta$  expressa a sensibilidade do ES ao distúrbio.

Essa formulação captura:

- o acúmulo gradual de biomassa lenhosa sob baixo distúrbio;
- a redução acelerada da persistência do ES sob regimes intensos ou frequentes;
- o controle funcional do processo de encroachment arbustivo.

## 5 Integração das Respostas Funcionais

As respostas funcionais  $R_{EI}(D)$  e  $R_{ES}(D)$  são integradas ao modelo como moduladores de estados-alvo e limites estruturais, e não como forças determinísticas diretas.

De forma conceitual:

$$K_{EI}(D) \propto R_{EI}(D) \quad \text{e} \quad K_{ES}(D) \propto R_{ES}(D)$$

Essa abordagem permite ao sistema:

- exibir múltiplos estados funcionais estáveis;
- responder de forma não linear ao distúrbio;
- transitar suavemente entre dominância herbácea e lenhosa.

## 6 Implicações para Vigor e NDVI Simulado

O vigor fisiológico ( $\phi$ ) e os índices derivados de visualização, como o NDVI simulado, são interpretados como **respostas emergentes** da interação entre cobertura estrutural e regime de distúrbio.

O NDVI simulado não representa reflectância espectral real, mas um **índice funcional comparável**, sensível às respostas não lineares dos estratos ao distúrbio. Essa escolha permite diagnósticos visuais de estresse, recuperação e persistência sem recorrer à simulação física detalhada da interação solo–planta–radiação.

## 7 Considerações sobre Implementação Computacional

Na arquitetura do *SisterApp*, as respostas funcionais ao distúrbio definem **estados-alvo** para os quais cada célula evolui ao longo do tempo, por meio de dinâmicas relaxacionais com passo de tempo fixo.

Essa estratégia:

- preserva a estabilidade numérica do sistema;
- evita crescimento ilimitado ou colapsos abruptos;
- mantém coerência entre formulação ecológica e implementação em C++.

## 8 Considerações Finais

A adoção de respostas funcionais assimétricas ao distúrbio para os estratos da vegetação campestre confere ao modelo maior fidelidade ecológica e clareza ontológica. A formulação apresentada permite representar, de forma simples e robusta, o papel central do distúrbio na manutenção de paisagens campestres, evitando tanto a simplificação excessiva quanto a complexificação desnecessária.