

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

Daniel Dutra Saraiva, Fábio Piccin Torchelsen, Gerhard Ernst Overbeck, Sandra Cristina Müller, Heinrich Hasenack, Leonardo Marques Urruth, Cassio Rabuske da Silva

Revista Bio Diverso (ISSN 2965-5765)

www.seer.ufrgs.br/biodiverso | Vol. 5 (Art. 5e1)

APÊNDICE I

Tabela S1. Top 25% dos municípios ($n = 54$) com maior perda percentual ponderada (PPP) de vegetação campestre nativa no bioma Pampa. A PPP representa a proporção da vegetação inicial remanescente em 1985 que foi perdida até 2023, considerando o impacto relativo dessa perda em relação à área total do município. Para cada município, são apresentados, em hectares, a área territorial, a perda absoluta (PA) de vegetação campestre e o ganho absoluto das áreas cultivadas com soja e silvicultura.

Município	Mesorregião	Área (ha)	PA (ha)	PPP (%)	Soja (ha)	Silvicultura (ha)
Candiota	Sudeste	93362,8	43943,3	47,07	17955,4	12214,5
Júlio de Castilhos	Centro Ocidental	192954,4	86532,5	44,85	112012,4	492,4
Tupanciretã	Centro Ocidental	225323,4	100527,2	44,61	135052,3	511,6
Quevedos	Centro Ocidental	54335,9	22603,8	41,6	24227,7	72,0
Pedras Altas	Sudeste	137398,5	56936	41,44	23549,2	13331,1
Pedro Osório	Sudeste	60375,7	24433,4	40,47	11798,0	5100,7
Jari	Centro Ocidental	85308	33028,3	38,72	33664,7	36,6
Capão do Cipó	Centro Ocidental	100779,6	38805,1	38,5	52045,8	66,9
Minas do Leão	Metropolitana de Porto Alegre	42433,9	15900,2	37,47	10616,2	6531,6
Arroio dos Ratos	Metropolitana de Porto Alegre	42579,1	15464,7	36,32	3166,5	11035,0
Butiá	Metropolitana de Porto Alegre	75218,7	27266	36,25	8740,4	22559,9
Aceguá	Sudoeste	155344	54340,3	34,98	25557,7	2113,7
São Martinho da Serra	Centro Ocidental	66954,7	23404,6	34,96	26941,2	60,1
Encruzilhada do Sul	Sudeste	334786,1	116703,9	34,86	25437,3	84371,7
Hulha Negra	Sudoeste	82260,8	28328,4	34,44	15170,0	3370,9
Pantano Grande	Centro Oriental	84122,5	28056,4	33,35	20247,0	16798,5
Rio Pardo	Centro Oriental	205111,2	66298,2	32,32	61277,3	12310,0

Bagé	Sudoeste	409036	127121,8	31,08	51895,7	18416,3
Boa Vista do Incra	Noroeste	50411,4	15591,6	30,93	31093,6	55,4
Jóia	Noroeste	123891,8	37708,7	30,44	71431,7	102,1
São Gabriel	Sudoeste	505346	153752,6	30,43	103178,5	16615,7
São Jerônimo	Metropolitana de Porto Alegre	93559,6	27563	29,46	4607,1	18262,8
Cachoeira do Sul	Centro Oriental	373606,4	109876,7	29,41	101179,1	23040,5
Dom Pedrito	Sudoeste	519405,1	152491,9	29,36	94854,0	3739,9
Manoel Viana	Sudoeste	139069,6	40736,3	29,29	38157,3	2840,7
Arroio do Padre	Sudeste	12469,3	3623,3	29,06	366,1	1705,3
São Miguel das Missões	Noroeste	122844,7	35001,9	28,49	29358,2	115,1
Vila Nova do Sul	Centro Ocidental	50827,8	14238,2	28,01	9451,6	3408,1
São Sepé	Centro Ocidental	220477,9	59751,5	27,1	58367,3	3830,7
Vale Verde	Metropolitana de Porto Alegre	32972,7	8625,9	26,16	8406,4	1888,5
Jaguarão	Sudeste	205184,5	53290,1	25,97	39278,8	7839,1
Barão do Triunfo	Metropolitana de Porto Alegre	43610,1	11200,8	25,68	334,9	8000,5
Pinhal Grande	Centro Ocidental	47811	12172	25,46	18571,7	13,5
Santa Margarida do Sul	Sudoeste	95529,9	24288,6	25,43	17283,1	6213,2
Cachoeirinha	Metropolitana de Porto Alegre	4377,8	1112,4	25,41	13,0	87,3
Herval	Sudeste	175971,7	43861,3	24,93	13036,7	10351,2
Lavras do Sul	Sudoeste	260096,9	64711,5	24,88	26831,5	7823,4
Cerro Grande do Sul	Metropolitana de Porto Alegre	32490,8	8026,1	24,7	-304,9	7214,7
Dom Feliciano	Metropolitana de Porto Alegre	135519,5	33050,7	24,39	1126,6	27151,4
Taquari	Centro Oriental	34996,7	8478,7	24,23	369,5	13741,9
Santiago	Centro Ocidental	241419,5	57898,8	23,98	55922,0	484,0
Sentinela do Sul	Metropolitana de Porto Alegre	28213	6763	23,97	575,8	2941,9
Cerrito	Sudeste	45169,9	10759,9	23,82	7740,5	1396,3
Amaral Ferrador	Sudeste	50598,3	11899,7	23,52	2350,3	6420,6
Piratini	Sudeste	353830	82432,1	23,3	26712,1	50135,7
Turuçu	Sudeste	25363,5	5739,2	22,63	4656,8	379,8
Maçambará	Sudoeste	168282	38003,8	22,58	25293,4	946,0
Caçapava do Sul	Sudeste	304814,7	68125,3	22,35	30911,7	6075,2
Canguçu	Sudeste	352625,3	77650,4	22,02	44625,2	29812,5

São Francisco de Assis	Sudoeste	250697,5	53739,9	21,44	49463,1	6553,6
Dilermando de Aguiar	Centro Ocidental	60051,8	12859,8	21,41	18456,6	245,3
Mariana Pimentel	Metropolitana de Porto Alegre	33845	7057,5	20,85	452,9	5285,7
Morro Redondo	Sudeste	24464,5	5043	20,61	1636,2	1844,3
Cruz Alta	Noroeste	136054,8	28021,7	20,6	81895,3	462,3

APÊNDICE II

Modelos preditivos para cenários futuros de perda do patrimônio campestre

Cenário 1

Modelo determinístico simples

Este modelo utiliza uma taxa fixa de incremento de supressão anual para calcular o tempo necessário até a completa extinção da vegetação campestre em áreas privadas. É uma abordagem direta e simples, mas que pode não refletir a dinâmica do processo de supressão ao assumir taxa de supressão constante ao longo do tempo e perda linear de vegetação campestre. Embora a simplicidade é sua principal vantagem, esse modelo oferece uma visão limitada e estática do processo de supressão.

A equação abaixo estima o número de anos necessários até a “extinção completa” da vegetação nativa campestre em áreas privadas.

$$V_t = V_0 - t \times r$$

Onde:

- V_t : Área (ha) de vegetação campestre remanescente após t anos.
- V_0 : Área (ha) atual de vegetação campestre remanescente no tempo inicial $t = 0$ (5.519.863 ha em áreas privadas).
- r : Mediana do incremento anual de supressão em hectares (106.750 ha/ano).
- t : Tempo em anos.

Cenário 2

Modelo determinístico com taxa percentual

Este modelo determinístico utiliza uma abordagem logarítmica para calcular o tempo necessário até que a vegetação campestre remanescente seja reduzida até 10% da sua área original em áreas privadas. No entanto, assim como no cenário anterior, as variações temporais na taxa de incremento de supressão não são consideradas. Embora forneça uma perspectiva mais detalhada do processo de supressão em relação ao primeiro cenário, ainda carece de uma representação dinâmica da perda de vegetação campestre ao longo do tempo.

A equação abaixo estima o número de anos necessários para que a vegetação remanescente seja reduzida a 10% de seu área atual em áreas privadas, assumindo uma

perda progressiva de vegetação campestre com taxa de incremento de supressão constante ao longo do tempo.

$$V_t = V_0 \times (1 - r)^t$$

Onde:

- V_t é a área (ha) de vegetação campestre remanescente após t anos.
- V_0 é a área (ha) atual de vegetação campestre remanescente no tempo inicial $t = 0$ (5.519.863 ha em áreas privadas).
- r é a taxa média de incremento de supressão anual (expressa como fração decimal: $0.014 = 1.4\%$).
- t é o tempo em anos.

Cenário 3

Modelo determinístico com taxa variável no tempo

Este modelo assume uma taxa de incremento de supressão variável que cresce ao longo dos anos com um limite assintótico de vegetação mínima remanescente que se encontra protegida dentro de unidades de conservação. Trata-se de um cenário tipicamente pessimista em que a taxa de supressão não é constante, mas se torna mais intensa ao longo do tempo devido a fatores antrópicos. Aqui nós usamos uma taxa inicial de incremento de supressão (r_0) que se baseia na mediana dos últimos cinco anos (2019 a 2023). Ao focar nos últimos cinco anos, estamos capturando uma tendência recente e relevante, refletindo as condições atuais de uso da terra e políticas ambientais. Além disso, evidências sugerem que a taxa de supressão tem aumentado ao longo do tempo, o que implica que as pressões sobre a vegetação campestre, seja por expansão agrícola ou outros fatores, estão se intensificando. Embora o modelo considere que a taxa de supressão não seja estática, mas influenciada por mudanças ao longo do tempo, a abordagem permanece determinística, pois não incorpora incertezas ou variações aleatórias.

A equação usada nesse modelo estima o número de anos necessários até que a vegetação campestre remanescente atinja a área mínima protegida pelas unidades de conservação.

Parâmetros iniciais do modelo:

- V_0 : Área (ha) atual de vegetação campestre remanescente no tempo inicial $t = 0$ (5.589.863 ha em áreas privadas e unidades de conservação).
- $V_{\min}$: Área (ha) mínima de vegetação campestre protegida (representa um limite inferior de vegetação herbácea e arbustiva em unidades de conservação; 70.000 ha).
- r_0 : Taxa inicial de incremento de supressão (0.037 ou 3,7% ao ano), que é obtida dividindo a taxa mediana de supressão anual (r) dos últimos cinco anos pela área atual (V_0). Portanto, r_0 representa a proporção da vegetação inicial que é suprimida anualmente, em termos relativos, ou seja, a área original de vegetação que é perdida a cada ano, o que a torna uma medida intuitiva e clara do processo de supressão.

r_1 : Taxa de variação anual na supressão (= desvio padrão das taxas históricas de incremento de supressão; 0.009 ou 0.9%), representando o crescimento anual do incremento. Usar a dispersão das taxas históricas como r_1 permite incluir de forma implícita a incerteza histórica sem a necessidade de um componente estocástico explícito.

Principais passos no R para calcular a área de vegetação campestre remanescente ao longo do tempo:

- **Cálculo da taxa de supressão no ano t (r_t):**

$$r_t = r_0 + r_1 \times t$$

A taxa de supressão (r_t) cresce linearmente com o tempo, de acordo com r_1 .

- **Cálculo da vegetação remanescente no ano t :**

$$V_t = V_0 \times \exp(-r_t \times t) + V_{\min}$$

O modelo assume que a vegetação restante é reduzida de forma exponencial em função da taxa de supressão. A função exponencial $\exp(-r_t \times t)$ descreve a redução exponencial da vegetação campestre. Para $t = 0$, a função exponencial $\exp(0) = 1$, então inicialmente a vegetação é igual a V_0 .

• Geração da sequência de anos:

Foi criado um código no R com uma sequência de anos de 0 a 200 (`anos <- seq(0, 200, by = 1)`). Esse intervalo simula a supressão ao longo de 200 anos, com passos de 1 ano.

• Cálculo da vegetação ao longo do tempo:

Foi usada a função `sapply()` no R para aplicar a função criada (`'vegetação_remanescente'`) para calcular a área de vegetação remanescente em cada ano com base na equação V_t . Os valores de V_t para a sequência temporal estabelecida são armazenados em um vetor de dados.

A função implementada no R estima o número de anos necessários até que a vegetação campestre remanescente atinja a área mínima protegida pelas unidades de conservação.

Cenário 4

Modelo estocástico simples

Este modelo simula um cenário estocástico onde a taxa de incremento de supressão (r_t) varia ao longo do tempo de acordo com uma distribuição normal, com parâmetros baseados nas taxas históricas de supressão, sem incluir explicitamente um termo de erro aleatório $\epsilon(t)$. Nesse modelo, as variações de r_t ocorrem naturalmente com base na aleatoriedade da distribuição normal, portanto, as incertezas (políticas, econômicas, ambientais, entre outras) são tratadas diretamente pelas variações das taxas ao longo do tempo.

A equação usada nesse modelo estima o número de anos necessários até que a vegetação campestre remanescente atinja a área mínima protegida pelas unidades de conservação.

Parâmetros iniciais do modelo:

- V_0 : Área (ha) atual de vegetação campestre remanescente no tempo inicial $t = 0$ (5.589.863 ha).
- $V_{\min}$: Área (ha) mínima de vegetação campestre protegida (70.000 ha).
- r_{med} : Taxa média de incremento de supressão anual ($0.014 = 1.4\%$). Representa a tendência central esperada em cada ano.
- $r_{\text{desv.pad}}$: Desvio padrão das taxas históricas de incremento de supressão ($0.009 = 0.9\%$).
- n_{sim} : Número de simulações a serem realizadas (10.000).

Como no modelo anterior, o objetivo é estimar os anos necessários até que a vegetação remanescente atinja a área mínima de vegetação ($V_{\min}$). A equação abaixo estima a área de vegetação campestre remanescente para cada ano (V_t):

$$V_t = V_{t-1} \times \exp(-r_t)$$

Onde:

- V_{t-1} é a vegetação no ano anterior.
- $\exp(-r_t)$ equivalente a e^{-r_t} , onde e é a base do logaritmo natural (aproximadamente 2.71828).
- r_t é a taxa de supressão no ano t .

Principais passos no R para calcular a área de vegetação campestre remanescente ao longo do tempo:

- Função de simulação estocástica:

Foi implementada uma função no R ('simular_anos_estocastico') para realizar as simulações considerando a aleatoriedade no processo de supressão. A função funciona da seguinte maneira:

1. Criação de um “vetor de resultados” para armazenar o número de anos que cada simulação levará para que a vegetação atinja o limite mínimo $V_{\min}$:

(anos_ate_Vmin <- numeric(n_simulacoes)).

2. Geração de uma simulação para cada uma das 10.000 rodadas. O loop for() no R percorre cada uma das $n_{\text{simulacoes}}$ e realiza os seguintes passos:

Passo 1: Define a vegetação inicial ($V_t <- V_0$) e o contador de tempo ($t <- 0$).

Passo 2: Enquanto a vegetação (V_t) for maior que o valor mínimo ($V_{\min}$), o loop interno executa os seguintes comandos:

- Geração de uma nova taxa de desmatamento aleatória com a função rnorm():

$r_t <- \text{rnorm}(1, \text{mean} = r_{\text{med}}, \text{sd} = r_{\text{desv.pad}})$ gera uma taxa de supressão aleatória a partir de uma distribuição normal com parâmetros baseados nas taxas históricas de supressão (média = 0.014 e desvio padrão = 0.009). A variabilidade da taxa de supressão reflete flutuações anuais devido a fatores imprevisíveis.

- Atualização da vegetação remanescente:

A equação V_t aplica a taxa de supressão à área atual da vegetação, diminuindo a vegetação remanescente para o próximo ano. Esse modelo é recursivo, ou seja, a área atual de vegetação depende do área do ano anterior. A área de vegetação no tempo t é atualizada multiplicando a vegetação do período anterior V_{t-1} por um fator exponencial que depende da taxa de supressão r_t . À medida que a taxa de supressão aumenta, a vegetação diminui mais rapidamente.

O contador t é atualizado para o próximo ano, até que a vegetação remanescente atinja a área mínima.

Passo 3: O número de anos necessário para que a vegetação atinja $V_{\min}$ é armazenado em anos_ate_Vmin[i].

3. Execução da simulação:

anos_ate_Vmin <- simular_anos_estocastico(V_0 , $V_{\min}$, r_{med} , $r_{\text{desv.med}}$, $n_{\text{simulacoes}}$).

Essa função realiza as 10.000 simulações, retornando o número de anos até que a vegetação caia abaixo de $V_{\min}$ para cada simulação.

4. Cálculo da mediana dos anos até atingir $V_{\min}$:

mediana_anos <- median(anos_ate_Vmin)

cat("Mediana dos anos até atingir $V_{\min}$:", mediana_anos, "anos\n")

A mediana dos anos até atingir $V_{\min}$ indica quanto tempo, em média, a vegetação levará para ser reduzida ao mínimo sob esse cenário estocástico de supressão. A mediana é utilizada para evitar a distorção causada por valores extremos, tornando o resultado mais robusto em relação a outliers.

Cenário 5

Modelo misto com variação temporal

Este modelo assume que a taxa de incremento de supressão (r_t) varia de forma totalmente aleatória a cada ano, sem qualquer dependência linear com o tempo t . No entanto, há evidência de uma tendência linear significativa de aumento na taxa de incremento de supressão ao longo dos anos (o incremento de supressão aumenta, a cada ano, cerca de 4% e cerca de 2,84% em relação à média, de acordo com uma regressão para série temporal). Além disso, o cenário 4 assume que a incerteza é incorporada diretamente através da variação da taxa de supressão (r_t), que é estocástica. No entanto, o modelo do cenário 5 combina elementos determinísticos (uma variação linear previsível ao longo do tempo) e estocásticos (incorporação de incerteza através de ruído aleatório)

na taxa de supressão anual. Isso permite que esse modelo capture tanto tendências de longo prazo quanto flutuações anuais imprevisíveis na supressão.

A equação usada nesse modelo oferece uma estimativa do número médio de anos necessários até que a vegetação campestre remanescente atinja a área mínima protegida.

Parâmetros iniciais do modelo:

Os parâmetros iniciais do modelo são definidos de forma semelhante ao modelo 3, mas agora combinado um componente determinístico (r_1) e um componente estocástico ($r_{\text{desv.pad}}$) na taxa de supressão anual.

- V_0 : Área (ha) atual de vegetação campestre remanescente no tempo inicial $t = 0$ (5.589.863 ha).

- $V_{\min}$: Área (ha) mínima de vegetação campestre protegida (70.000 ha).

- r_0 : Taxa inicial de incremento de supressão (0.037 ou 3,7% ao ano).

- r_1 : Taxa de variação anual na supressão (regressão Prais-Winsten; $\beta = 0.0003963$ ou 0.03963% ao ano), que reflete a tendência linear no incremento de supressão ao longo do tempo (um aumento de cerca de 2,84% em relação à média a cada ano).

- $r_{\text{desv.pad}}$: Desvio padrão das taxas históricas de incremento de supressão (0.009 = 0.9%). A dispersão das taxas históricas é usada no termo de erro $\epsilon(t)$ para adicionar aleatoriedade e variação à taxa de supressão (r_t) em cada ano. Em termos práticos, isso quer dizer que r_t , em cada ano, pode variar aleatoriamente dentro de uma faixa de aproximadamente quase 1% (0.9%) para mais ou para menos, devido ao termo de erro.

- n_{sim} : Número de simulações a serem realizadas (10.000).

Principais passos no R para calcular a área de vegetação campestre remanescente ao longo do tempo:

• Função de simulação:

Foi implementada uma função no R ('simular_anos_estocastico_com_variacao') para realizar as simulações, combinando a variação temporal determinística e o ruído estocástico. A função funciona da seguinte maneira:

1. Criação de um "vetor de resultados" para armazenar o número de anos que cada simulação levará para que a vegetação atinja o limite mínimo $V_{\min}$:

(anos_ate_Vmin <- numeric(n_simulacoes)).

2. Geração de uma simulação para cada uma das 10.000 rodadas. O loop for() no R percorre cada uma das $n_{\text{simulacoes}}$ e realiza os seguintes passos:

Passo 1: Define a vegetação inicial ($V_t <- V_0$) e o contador de tempo ($t <- 0$).

Passo 2: Enquanto a vegetação (V_t) for maior que o valor mínimo ($V_{\min}$), o loop interno executa os seguintes comandos:

- Cálculo da taxa de supressão com variação temporal e ruído estocástico:

$$r_t <- r_0 + r_1 \times t + \epsilon(t)$$

O componente determinístico ($r_0 + r_1 \times t$) aumenta linearmente com o tempo. A função `rnorm(1, mean = 0, sd =  $r_{\text{desv.pad}}$ )` adiciona um valor aleatório (ao termo de erro) extraído de uma distribuição normal com média zero e desvio padrão de 0.9. A escolha de um erro estocástico com média zero assegura que o comportamento imprevisível do modelo seja aleatório e sem viés, refletindo uma variabilidade natural ao redor da tendência esperada, mas sem introduzir uma tendência adicional por conta do ruído. O desvio padrão determina a intensidade dessa variabilidade, mas, com uma média zero, o impacto dessas flutuações é balanceado ao longo do tempo.

- Atualização da vegetação remanescente:

A fórmula $V_t = V_{t-1} \times \exp(-r_t)$ aplica a taxa de supressão calculada a área atual de vegetação, diminuindo a área remanescente para o próximo ano.

O tempo t é incrementado em 1 ano até que a vegetação remanescente atinja o valor mínimo.

Passo 3: O número de anos necessário para que a vegetação atinja $V_{\min}$ é armazenado em `anos_ate_Vmin[i]`.

3. Execução da simulação:

```
anos_ate_Vmin<- simular_anos_estocastico_com_variacao( $V_0$ ,  $V_{\min}$ ,  $r_0$ ,  $r_1$ ,  $r_{\text{desv.med}}$ ,  
n_simulacoes).
```

Essa função realiza as 10.000 simulações, retornando o número de anos até que a vegetação caia abaixo de $V_{\min}$ para cada simulação.

4. Cálculo da mediana dos anos até atingir $V_{\min}$:

- Depois de rodar todas as simulações, a mediana do número de anos até atingir o valor mínimo de vegetação é calculada, como no modelo anterior.

Cenário 6

Modelo misto com efeitos de ganho

O modelo do cenário 5 fornece uma visão geral da perda de vegetação campestre, onde a parte determinística do modelo representa a tendência de longo prazo na taxa de incremento de supressão, enquanto o erro estocástico captura as flutuações aleatórias em torno dessa tendência. Já o cenário 6 consiste em um modelo mais complexo, que combina uma tendência determinística, baseada em coeficientes ajustados para incrementos anuais de supressão e expansão agropecuária, com variações estocásticas. É um modelo mais realista, uma vez que considera o impacto altamente significativo do incremento agrícola anual sobre a taxa de supressão (regressão Prais-Winsten; $\beta = 0.79$, $t = 12.280$, $P < 0.001$). Esse modelo incorpora erro estocástico somente na taxa de supressão (rt_1). O próximo cenário inclui erro estocástico tanto em rt_1 como no incremento agrícola (rt_2).

Essa abordagem permite capturar as dinâmicas complexas e multifacetadas do processo de supressão, que é moldado por fatores previsíveis — como tendências de uso da terra — e imprevisíveis, incluindo incertezas econômicas, políticas e climáticas. A inclusão da variação estocástica reflete as flutuações interanuais nas taxas de supressão, permitindo que o modelo responda a mudanças inesperadas, como alterações nas políticas de uso da terra. Isso adiciona um grau de realismo que não é capturado por modelos puramente determinísticos, pois a dinâmica de uso da terra raramente segue uma trajetória linear e previsível. Em última análise, esse modelo fornece uma estimativa mais refinada do número médio de anos necessários para que a vegetação campestre remanescente alcance a área mínima protegida.

Parâmetros iniciais do modelo:

Os parâmetros iniciais do modelo são definidos de forma semelhante ao modelo 5, incluindo agora uma taxa de crescimento agrícola ao longo do tempo (rt_2).

- V_0 : Área (ha) atual de vegetação campestre remanescente no tempo inicial $t = 0$ (5.589.863 ha).
- $V_{\min}$: Área (ha) mínima de vegetação campestre protegida (70.000 ha).
- r_0 : Taxa inicial de supressão (0.037 ou 3,7% ao ano).
- r_1 : Taxa de variação anual na supressão (regressão Prais-Winsten; $\beta = 0.00039628$), que reflete uma tendência linear no incremento de supressão ao longo do tempo (um aumento de cerca de 2,84% em relação à média a cada ano).
- r_2 : Taxa de variação anual na área agrícola (regressão Prais-Winsten; $\beta = 0.0002443$), que reflete uma tendência estacionária no incremento de área agrícola ao longo do tempo (um aumento de cerca de 1,70% em relação à média a cada ano).

$r_{\text{desv.pad}}$: Desvio padrão das taxas históricas de supressão ($0.009 = 0.9\%$). Representa o ruído estocástico que reflete incertezas no processo de supressão.

n_{sim} : Número de simulações a serem realizadas (10.000).

Anos_{sim} : Anos simulados (500 anos).

Principais passos no R para calcular a área de vegetação campestre remanescente ao longo do tempo:

• Função de simulação:

Foi implementada uma função no R ('simular_anos_misto') para realizar as simulações, combinando a variação temporal determinística e o ruído estocástico. A função funciona da seguinte maneira:

1. Simulação:

Para cada uma das 10000 simulações ($n_{\text{simulacoes}}$) foram realizados os seguintes passos:

Passo 1: Inicializa a vegetação como $V_t = V_0$ para cada simulação.

Passo 2: Simula ano a ano (t variando de 1 a anos_simulados), até que a vegetação caia abaixo do limite mínimo ($V_{\min}$).

2. Cálculo da taxa de supressão (r_t): Para cada ano t , a taxa de supressão é calculada combinando:

- A taxa inicial de supressão (r_0).
- O efeito temporal ($r_1 \times t$), que aumenta a taxa de supressão com o passar do tempo.
- O impacto da taxa de variação anual na área agrícola ($r_2 \times t$).
- Um termo estocástico ($\text{rnorm}(1, \text{mean} = 0, \text{sd} = r_{\text{desv.pad}})$), que adiciona uma incerteza baseada em uma distribuição normal com média zero e desvio padrão de 0.009.

A taxa é calculada usando a seguinte fórmula:

$$r_t = r_0 + r_1 \times t + r_2 \times t + \epsilon(t)$$

3. Atualização da vegetação restante: A quantidade de vegetação é então atualizada usando a fórmula exponencial:

$$V_t = V_{t-1} \times \exp(-r_t)$$

Onde:

- V_{t-1} é a vegetação no ano anterior.
- $\exp(-r_t)$ equivalente a e^{-r_t} , onde e é a base do logaritmo natural (aproximadamente 2.71828).
- r_t é a taxa de supressão no ano t .

O valor de vegetação no tempo t é atualizado multiplicando a vegetação do período anterior V_{t-1} por um fator exponencial que depende da taxa de supressão r_t . À medida que a taxa de supressão aumenta, a vegetação diminui mais rapidamente.

4. Condição de parada: Se a vegetação restante V_t cair abaixo do valor mínimo $V_{\min}$, o tempo t em que isso ocorre é armazenado no vetor resultados[i] para aquela simulação, e o loop é interrompido.

5. Execução da simulação: Após definir a função, executamos o modelo rodando 10000 simulações ($n_{\text{simulacoes}}$) usando os parâmetros definidos. A função retorna o número de anos até a vegetação atingir o valor mínimo $V_{\min}$ para cada uma das simulações.

6. Cálculo da mediana dos anos até atingir $V_{\min}$: Depois que todas as simulações são concluídas, a mediana dos anos até que a vegetação atinja $V_{\min}$ é calculada usando a função median, desconsiderando eventuais valores "NA" (quando $V_{\min}$ não foi atingido dentro do período simulado).

A simulação implementada nesse modelo oferece uma distribuição de quantos anos são necessários para que a vegetação caia abaixo de $V_{\min}$ em diferentes cenários. Isso

reflete a incerteza associada ao processo de supressão, onde o comportamento não segue um padrão fixo, mas é influenciado por variações aleatórias.

Cenário 7

Modelo misto com erro estocástico nos incrementos de supressão e área agrícola

Este modelo representa uma extensão do modelo 6, introduzindo um componente estocástico adicional na taxa de incremento de área agrícola, o que permite capturar a incerteza associada à expansão futura da agricultura. Ao incorporar a variabilidade estocástica nos incrementos anuais de supressão e área agrícola, esse modelo oferece uma representação mais robusta e realista das complexas dinâmicas de uso da terra e das políticas agrícolas. Esse cenário considera que a expansão agrícola pode ser influenciada por fatores imprevisíveis, como variações econômicas, mudanças nas políticas públicas, eventos climáticos extremos e mudanças nos padrões de uso da terra, os quais impactam diretamente a perda de vegetação campestre. Esse modelo, portanto, representa de maneira mais precisa as flutuações e incertezas interanuais no processo de supressão, fornecendo uma estimativa mais realista do número médio de anos necessários para que a vegetação campestre remanescente alcance a área mínima protegida.