



RESILIÊNCIA DA ESTRUTURA DO REBANHO DE BOVINOS LEITEIROS AOS ACIDENTES COM RAIOS

RESILIENCE OF THE DAIRY CATTLE HERD STRUCTURE TO LIGHTNING ACCIDENTS

Luís Alberto Ambrósio ¹

<https://orcid.org/0000-0001-8354-8634>

Luciandra Macedo de Toledo ²

<https://orcid.org/0000-0001-5383-0217>

Jackson Barros do Amaral ³

<https://orcid.org/0000-0001-9415-8703>

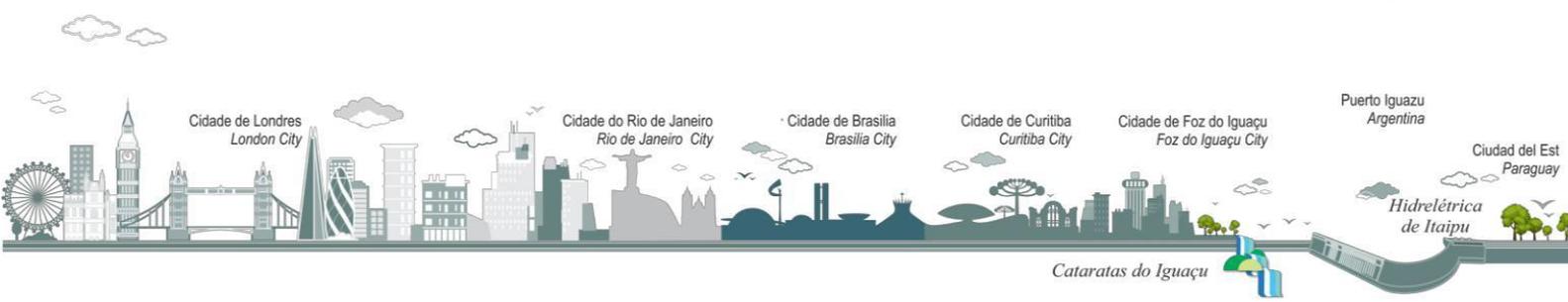
Resumo: As mudanças climáticas estão produzindo aumento na frequência de raios e no risco de acidentes com animais no meio rural. A morte de animais por fulminação causa desestabilização da estrutura do rebanho gerando ineficiências no manejo e perdas econômicas. Evitar a exposição dos

¹ Graduação em Engenharia Agrônoma pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz USP, mestrado em Economia Agrária pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz USP e doutorado em Economia Aplicada pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz USP. Atualmente é pesquisador científico do Centro APTA Bovinos de Leite - Instituto de Zootecnia - Nova Odessa, SP. Tem experiência na área de Economia, com ênfase em Economia dos Recursos Naturais, atuando atualmente nos seguintes temas: Cadeia de Produção de Leite, Planejamento Agro-ambiental com Programação Multicritério, Síntese Emergética, Modelagem e Simulação da Dinâmica de Serviços Ecosistêmicos e Modelagem e Simulação Dinâmica de Sistemas de Produção de Leite, Resiliência de Sistemas de Produção Agropecuários aos Distúrbios das Mudanças Climáticas. São Paulo, Brasil. ambrosioiz@yahoo.com.br

² Possui graduação em Zootecnia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, mestrado em Zootecnia pela Universidade de São Paulo e doutorado em Zootecnia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Atualmente é Pesquisadora Científica do Instituto de Zootecnia - APTA/SAA. Tem experiência na área de Zootecnia, com ênfase em comportamento animal, atuando principalmente nos seguintes temas: bovinos, comportamento materno-filial, manejo de bezerros. São Paulo, Brasil. luciandra.toledo@sp.gov.br

³ Graduação em Medicina Veterinária pela Universidade Federal Rural de Pernambuco. Residência em Clínica Médica Veterinária, pela Clínica de Bovinos de Garanhuns-PE da UFRPE. Mestrado em Patologia Veterinária, na área de Clínica Médica, pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Doutorado em Medicina Veterinária na área de Reprodução Animal, pela Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Atuou como Pesquisador Científico, na área de Sanidade Animal, no Instituto de Zootecnia de Nova Odessa-SP, da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo no período de maio de 1994 a março de 2022. Atualmente é Pesquisador Científico, na mesma Secretaria, junto ao Instituto Biológico de São Paulo- SP no Centro de Pesquisa de Sanidade Animal. Tem experiência com bovinos nas áreas de Clínica Médica Veterinária, Clínica da Reprodução e Perícias de Bem-estar Animal. Cadastrado como Auxiliar da Justiça, no Tribunal de Justiça de São Paulo (TJSP), para realização de perícias veterinárias. São Paulo, Brasil. jackson.amaral@sp.gov.br

IJERRS - ISSN 2675 3456 - V. 4, N. 3, 2022 p. 1





animais aos acidentes por raios é uma ação de construção de resiliência climática da bovinocultura leiteira que melhora o padrão ético da pecuária. A operacionalização da resiliência como atributo do sistema de produção gera informações que norteiam a adoção de tecnologia sustentável e a gestão de rebanhos afetados por distúrbios causados por raios. A metodologia de Dinâmica de Sistemas foi usada para simular cenários quantificando a resiliência da estrutura do rebanho aos distúrbios por raio. No cenário brando com distúrbio por raio de magnitude igual a 0,10 houve morte de 10 vacas em lactação de um total de 186,25 unidades animais (UA) e deixaram de ser vendidas dez vacas, quatro bezerras e cinco novilhas, com demora de dois anos para estabilizar a estrutura do rebanho. No cenário severo com distúrbio por raio de magnitude de 0,17 resultou na morte de 17 vacas em lactação houve perda de 11,75 UA e para um distúrbio com magnitude igual ou acima de 0,18 o sistema não recuperou a estabilidade da estrutura do rebanho inicial antes do acidente com raio. Perder a resiliência nesta magnitude é preocupante considerando a possibilidade de fulminação de bovinos leiteiros na ordem de até 50%, magnitude de 0,50, dos animais da propriedade em um único evento. Os experimentos in silico com simulações do modelo Rebanho geraram cenários com comportamentos contraintuitivos da resiliência da estrutura do rebanho, que promovem a aprendizagem e são úteis para o gerenciamento da bovinocultura leiteira a pasto.

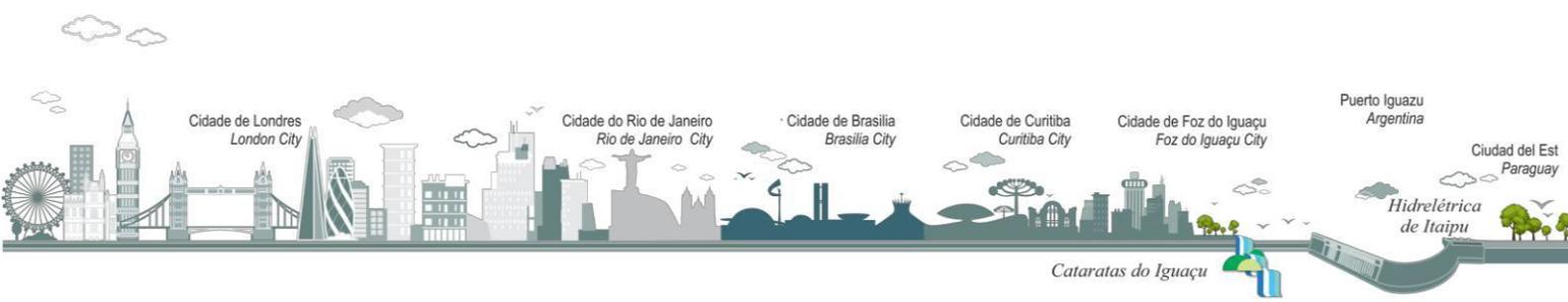
Palavras-chave: Inventário animal. Modelagem. Mudança climática

Abstract: Climate change is producing an increase in the frequency of lightning strikes and the risk of accidents with animals in rural areas. The animals' death by fulmination causes herd's structure destabilization, generating handling inefficiencies and economic losses. Avoiding the exposure of animals to lightning accidents is an action to build climate resilience of dairy cattle that improves the ethical standard of livestock. The operationalization of resilience as an attribute of the dairy cattle production system generates information that guides the adoption of sustainable technology and the management of herds affected by disturbances caused by lightning disturbances. The System Dynamics methodology was used to simulate scenarios quantifying the resilience of the herd structure to lightning disturbances. In the mild scenario with lightning disturbance of magnitude equal to 0.10, 10 lactating cows died, out of a total of 186.25 animal units (AU) and ten cows, four calves and five heifers were no longer discarded with a delay of two years to stabilize the herd's structure. In the severe scenario, a lightning disturbance with a magnitude of 0.17, which resulted in the death of 17 lactating cows, there was a loss of 11.75 AU. For a disturbance with magnitude equal to or above 0.18, the system did not recover the stability of the structure of the initial herd before the lightning accident. Losing resilience in this magnitude is worrying considering the possibility of dairy cattle fulmination in the order of up to 50%, magnitude of 0.50, of the animals on the farm in a single event. The in-silico experiments with simulation of the Herd model generated scenarios with counterintuitive behaviors of the herd structure resilience, which promote learning and are useful for the management of pasture-based dairy cattle system.

Key words: Animal inventory. Modelling. Climate change.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas devido ao aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera estão associadas com o aumento da temperatura do ar e da frequência e intensidade de tempestades provocando aumento da incidência de raios nas regiões brasileiras mais afetadas pelo fenômeno El Niño (PINTO Jr et al., 2013). As projeções da



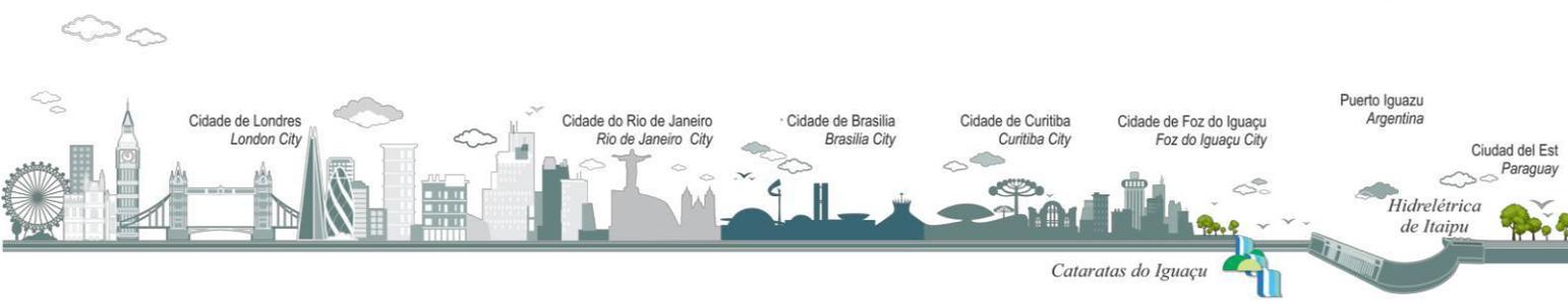


incidência de raios apresentam tendências crescentes no verão e outono com aumento de um dia de trovoada para cada 0,1°C de aumento na temperatura da superfície (SANTOS et al., 2016^a; SANTOS et al., 2016^b; SANTOS et al., 2017; PINTO Jr. e PINTO, 2020). As populações rurais e os bovinos ficam mais vulneráveis aos acidentes por raios com a rápida evolução deste fenômeno climático. No Brasil, de 2000 a 2019, houve uma média anual de 110 casos de mortes de humanos por raio, sendo 26% em atividades do agronegócio (ELAT, 2021). Pinto Jr (2021) relatou a morte por raios de 2973 bovinos entre 2010 e 2020 no Brasil.

Os sistemas de produção a pasto expõem os bovinos leiteiros aos acidentes por raios devido ao comportamento social dos animais de agrupar no pasto e de buscar abrigo da chuva sob as copas das árvores e a proximidade de cercas que atraem os raios transmitindo eletricidade. A bovinocultura leiteira está desprevenida para enfrentar o avanço de acidentes por raios que causam mortes coletivas, ineficiência no manejo dos animais e prejuízo econômico.

Uma consequência grave de acidentes com morte de animais é o efeito direto e indireto na estrutura do rebanho, a qual é focada no equilíbrio da quantidade de animais em cada categoria para alocar, com eficiência, os recursos na produção de leite. A gestão da estabilização do rebanho é um processo complexo que envolve o manejo de fatores de reprodução, sanitário, genético e comercial. Por isto, a morte acidental fulminante de vários animais ao mesmo tempo causa alterações não esperadas na dinâmica da estrutura do rebanho. Neste contexto, a operacionalização do conceito de resiliência da estrutura do rebanho, como atributo do sistema de produção, gera informações que norteiam a adoção de tecnologias sustentáveis e a gestão de rebanhos afetados por distúrbios causados por raios. Neste trabalho, define-se a resiliência da estrutura do rebanho como sendo o potencial dinâmico de um sistema de produção de leite para manter e/ou recompor o equilíbrio das categorias animal e suas funções quando e enquanto for afetado por um distúrbio natural ou antropogênico.

A modelagem de Dinâmica de Sistemas foi usada para medir e analisar a resiliência aos acidentes por raios, em conformidade com princípios zootécnicos e gerenciais que norteiam o manejo do rebanho, contribuindo para responder as questões: Como a variação súbita na quantidade de animais de cada categoria afeta a estabilização da estrutura do rebanho ao longo do tempo? Qual é a resiliência da estrutura do rebanho aos distúrbios





causados pelos raios? Como esta resiliência pode ser medida e avaliada? Como a avaliação da resiliência pode ser usada para planejamento do sistema de produção de bovinos leiteiros?

Os objetivos deste trabalho foram: (1) Executar experimentos *in silico* simulando a dinâmica da estrutura no cenário linha de base (sem fulminação) e nos cenários com magnitudes de distúrbios em termos de proporção de animais mortos por raio, no rebanho; (2) Projetar valores dos índices de resiliência e avaliar a resiliência da estrutura do rebanho do sistema de produção de leite aos distúrbios por raios.

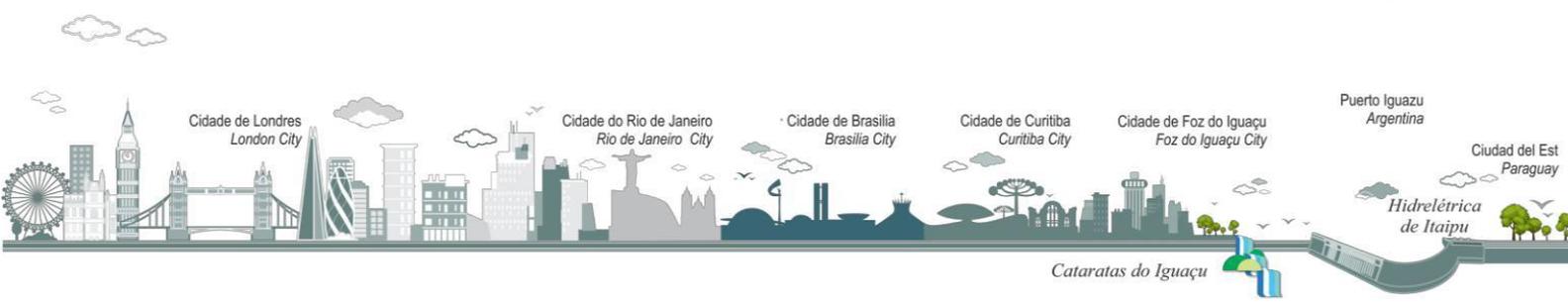
MATERIAL E MÉTODOS

Acidentes por raios em bovinos leiteiros

Nos acidentes por raio, a propagação da eletricidade pelo corpo do bovino é agravada pela posição das patas e pela pressão que seu peso exerce no contato das patas com o solo úmido, facilitando a transmissão de corrente elétrica e causando lesões e morte do animal por fulminação (LIMA et al., 2017). No Brasil, os registros técnicos e científicos de mortes de bovinos leiteiros por raios são escassos. Watanabe et al. (2010) relataram que os registros de tempestades e as alterações no ambiente próximos aos animais mortos assumem papel determinante no diagnóstico diferencial de outras causas de morte súbita.

Gottschall et al. (2010) relataram que acidentes com raios foram responsáveis por 11,1% da *causa mortis* de animais na faixa etária de 2 a 3 anos, em um rebanho de bovinos de corte em sistema de recria e terminação de machos. Pinto Jr (2021) relatou a morte por raios de 2973 bovinos no Brasil entre 2010 e 2020 sendo 437 no estado do Mato Grosso, 361 em São Paulo, 358 em Mato Grosso do Sul e 249 em Tocantins e 1568 em outros estados, estimando um prejuízo de R\$ 15 milhões.

Para estabelecer a quantidade de animais mortos durante um evento de descarga elétrica usamos dados de casos noticiados na imprensa. Os animais ficam mais vulneráveis às descargas elétricas e fulminação na pecuária de corte do que na pecuária leiteira. Na pecuária de corte é mais frequente ocorrer morte simultânea de dezenas de animais por raio, conforme reporta a notícia de que 103 animais de um rebanho da raça nelore morreram por raio em Cacoal – Rondônia em 9/03/2018 (OLIVEIRA, 2018). Em sistemas de produção com





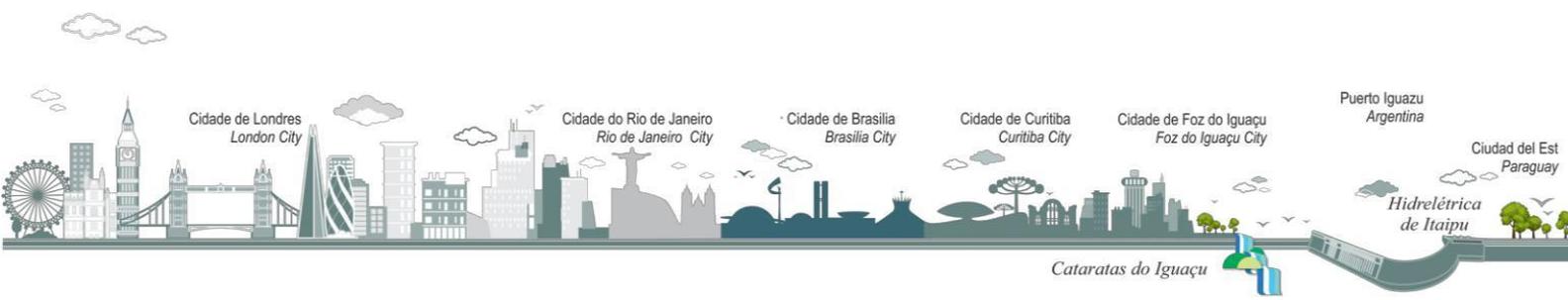
animais de dupla aptidão em Pedregulhos – São Paulo houve a fulminação de 84 animais da raça guzerá em 02/01/2018 (SCHIAVONI, 2018).

Na pecuária leiteira, a quantidade de animais mortos coletivamente por raio é menor, como ocorreu no caso noticiado de 12 vacas leiteiras mortas por raio dentre as 58 que estavam no mesmo piquete em 29/04/2016 em São José do Rio Preto – São Paulo (ANDRADE, 2016). Outro acidente ocorreu em Ouro Verde no oeste de Santa Catarina, em 14/04/2020, matando 16 das 30 vacas em lactação (FIGUEIRÓ, 2020). Mas, as perdas são relativamente significativas considerando que os rebanhos leiteiros são menores. Portanto, temos uma amplitude de 20,6 a 53,3% dos animais de um rebanho de bovinos leiteiros mortos por um evento de raio. Outros casos com porcentagens menores foram noticiados, mas a morte de um ou dois animais por raio é menos noticiada, por pastejarem em grupo social ou mesmo por não ser pauta de interesse jornalístico.

Na prática, a magnitude do distúrbio é equivalente a magnitude da corrente elétrica do raio medida em quilo amperes (kA) que pode alcançar 400 kA, com média de 30 kA, pois esta é a grandeza que apresenta potencial de causar “choque” e danos aos animais (PINTO Jr e PINTO, 2000). Entretanto, não há medições práticas de raio nas condições de campo que possam informar as relações entre a magnitude da corrente elétrica e o potencial de dano de fulminação. Por isso, assume-se, como variável *proxy*, a magnitude do distúrbio na escala entre 0 (não ocorre morte de animais) e 1 (perda direta máxima de animais, 100%) a qual permite criar cenários baseados na proporção de animais afetados pelo raio. Os serviços de monitoramento de descargas elétricas, como o do INPE, poderão fornecer informações úteis para a prevenção de acidentes com raio como também para obter uma medida da magnitude do distúrbio e a frequência de incidência.

Dinâmica de Sistemas e Metamodelo do Ecosistema Planta-Animal (MEPA)

O modelo MEPA foi construído por Ambrósio et al. (2008) em modelagem participativa a fim de se construir consenso sobre o manejo de bovinos leiteiros em sistemas de produção a pasto usando a Dinâmica de Sistemas com enfoque modular flexível. Este enfoque permite obter e conectar os submodelos que representam subsistemas atendendo as especificidades das

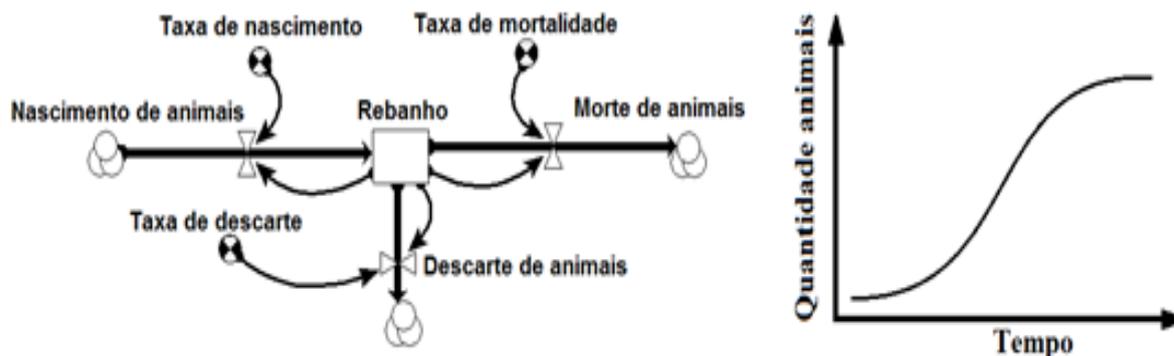




estruturas e processos envolvidos na análise da dinâmica de problemas complexos. O software Simile® usado na modelagem e simulação apresenta comandos que facilitam a construção e a modificação dos diagramas de estoques e fluxos. O elemento Association Submodels do Simile® permite incluir as relações matemáticas e lógicas entre os submodelos necessárias para se efetuar mudanças dinâmicas entre as variáveis de diferentes classes. O MEPA contém o submodelo Rebanho construído para simular o comportamento da estrutura do rebanho sob diferentes cenários de índices zootécnicos do sistema de produção de leite a pasto.

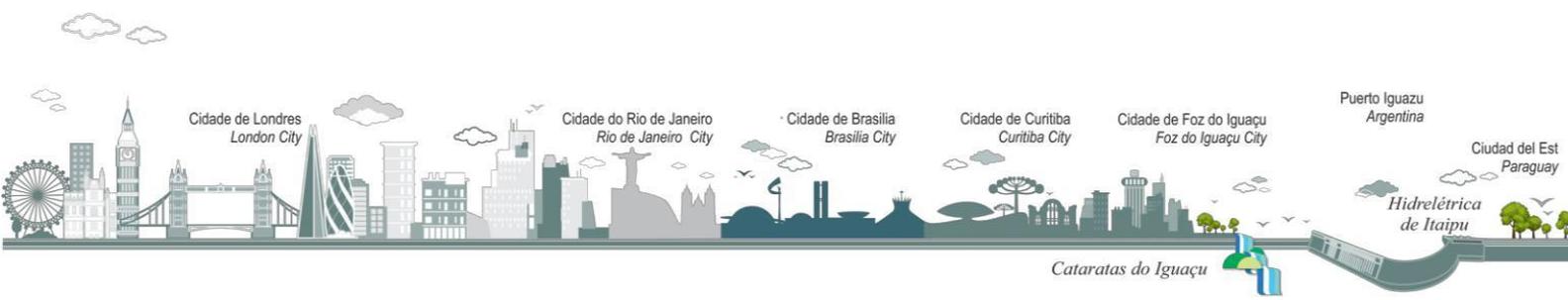
Neste trabalho, o submodelo Rebanho foi adaptado para simular a dinâmica da estrutura do rebanho nos cenários de acidentes com diferentes magnitudes de distúrbios por raio nas diversas categorias de animais classificadas por faixa etária e função. O modelo computacional é apresentado em diagrama de estoques e fluxos o qual possui os seguintes símbolos gráficos (Quadro 1): Variável, Estoque, Nuvem, Fluxo e Seta de influência (STERMAN, 2000). A simulação do modelo computacional, com o método de integração de Euler, gera uma curva do comportamento ao longo do tempo (Behavior Over Time – BOT) das variáveis estados de interesse, Figura 1.

Figura 1 - Exemplo de diagrama de estoque e fluxos de um modelo computacional, usando símbolos de Forrester e gráfico de comportamento ao longo do tempo (BOT) hipotético.



Fonte: os autores, 2022.

No modelo Rebanho, Figura 2, a quantidade de animais é dimensionada em função do tamanho da área do pasto e da capacidade de suporte da pastagem, expressa em unidade animal por hectare ano (UA/ha/ano).





Quadro 1 - Elementos usados no diagrama de estoques e fluxos com símbolos de Forrester do software Simile^(R).

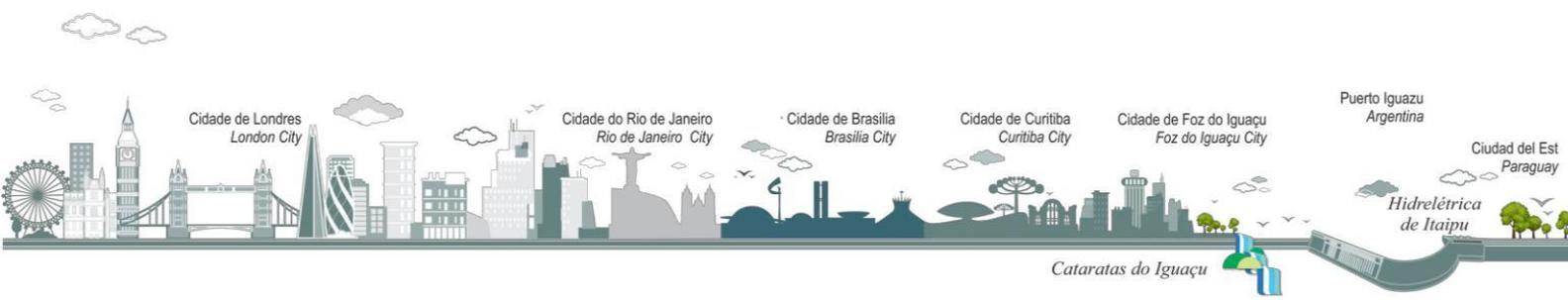
Símbolos	Descrição
 Variável	As variáveis representam as relações, calculadas por equações algébricas, entre os componentes do sistema. Em geral são variáveis auxiliares representando as taxas dos fluxos ou variáveis totalizadoras que estabelecem relações entre dois compartimentos, por exemplo.
 Estoque	Os compartimentos são estoques que indicam o estado do sistema a cada momento, é onde se processam os cálculos da dinâmica do sistema. A partir de um estoque inicial, a cada passo de tempo, o estoque é modificado somando as quantidades dos fluxos de entrada e subtraído as quantidades dos fluxos de saída. Um compartimento pode ter vários fluxos de entrada e de saída, cada um representando uma influência específica sobre o estoque.
 Fluxo	O fluxo representa as ações que geram as variações produzidas nos estoques do sistema. A válvula ou ampulheta representa o controle do fluxo das ações, análogo ao registro de uma torneira que determina a quantidade do fluxo de água.
 Nuvem	Inserido no início da seta de fluxo o símbolo de Nuvem representa as fontes de influências do ambiente que estão fora do escopo da modelagem e, portanto, não são identificadas nem quantificadas. Quando o fluxo não é dirigido para um compartimento a Nuvem é colocada junto à ponta da seta.
 Seta de influência	As setas de influência representam as ligações e transmissão de informações entre os componentes do sistema.

Fonte: os autores, 2022.

Uma UA equivale a 450 kg de peso corpóreo (PETERSON, 1961). O rebanho é formado por nove categorias de animais: Vaca Lactação Primípara, Vaca Lactação Multípara, Vaca Seca, Bezerra (0 a 1 ano), Bezerro (0 a 1 ano), Novilha (1 a 2 anos), Novilha (2 a 3 anos), Tourinho (1 a 3 anos) e Touro que se alteram em função de seis tipos de fluxos de animais em cada categoria, com intervalo de tempo igual a um ano (Nascimento, Morte, Mudança entrando na categoria (In), Mudança saindo da categoria (Out), Descarte e Compra). O estoque de animais em cada categoria (QCategoria i), no tempo t, é função das taxas (tj) dos fluxos de animais no tempo t mais o estoque acumulado no período anterior (t-1), Campos et al. (2009).

O diagrama, Figura 2, apresenta o modelo Rebanho constituído por nove submodelos: Vaca, Bezerro, Novilha, Reprodutor, Inventário, Produção, Calibração, Distúrbio e Resiliência.

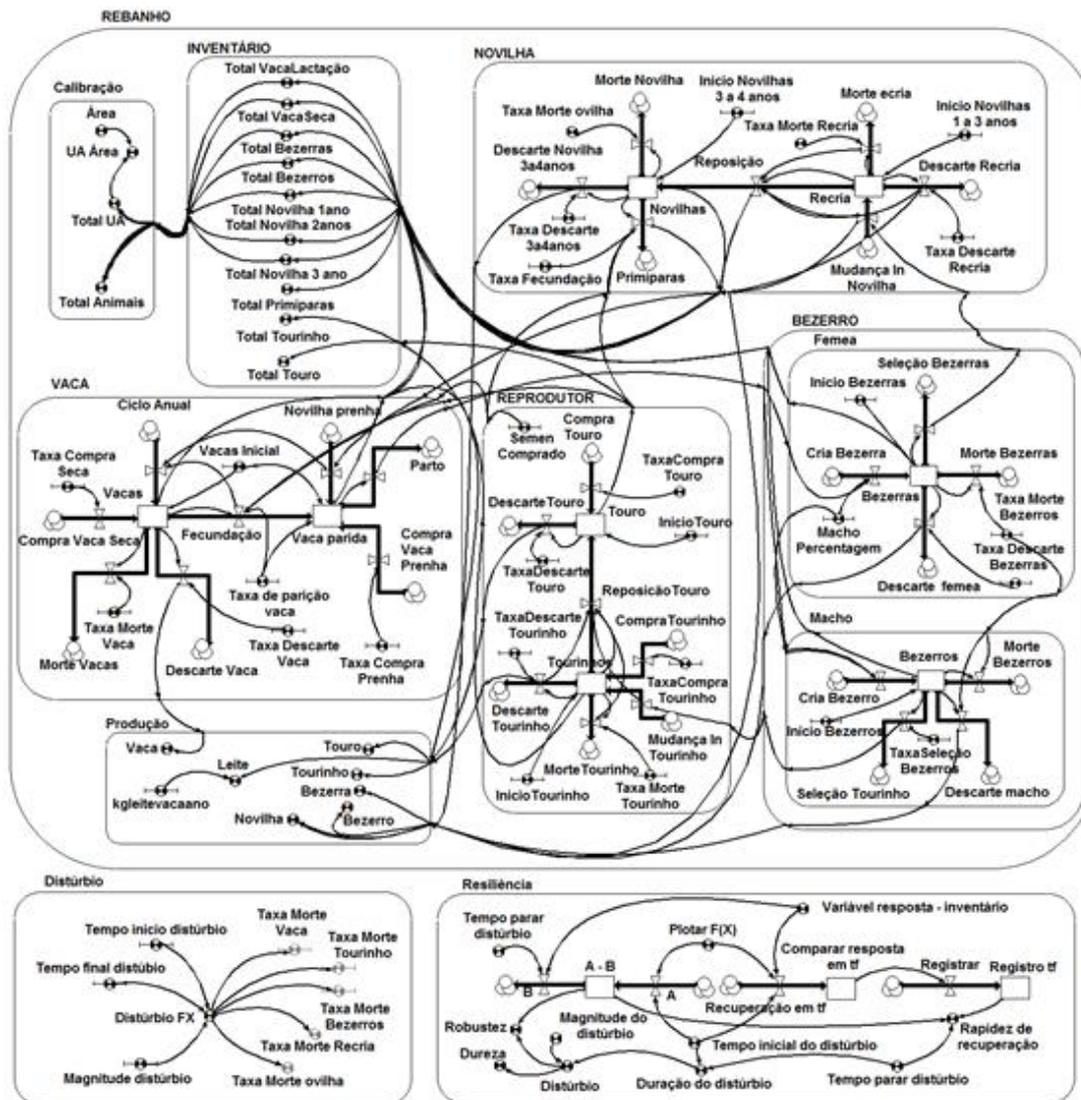
Para a simulação das equações diferenciais usou-se o algoritmo de integração de Euler. O modelo foi calibrado supondo um sistema de produção com inseminação artificial, com a quantidade de animais anual constante e ajustando a taxa de lotação em função da oferta de





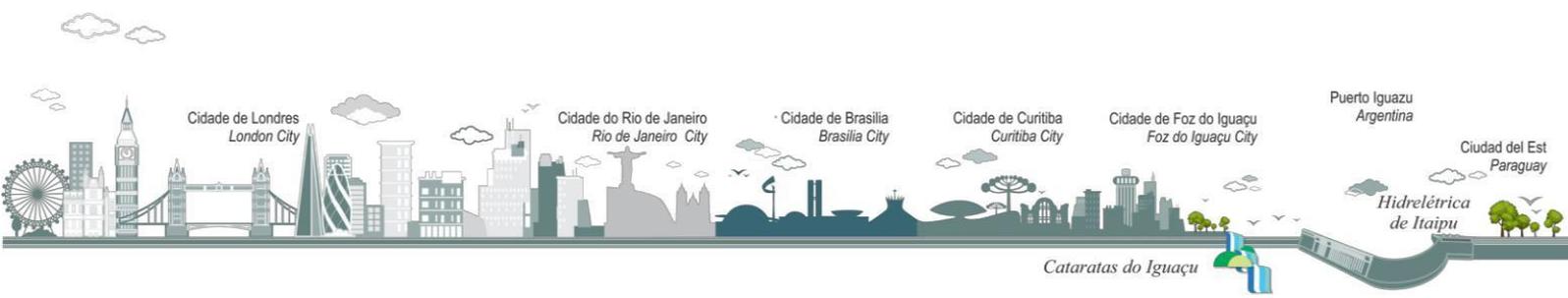
ferragem no período das águas e de dietas suplementadas no período seco. O rebanho inicial (t_0) contém 120 vacas a serem fecundadas por inseminação artificial, a uma taxa de parição de 75%.

Figura 2 - Diagrama sistêmico do modelo Rebanho modificado com a adição dos submodelos Distúrbio e Resiliência.



Fonte: os autores, 2022.

Adotaram-se os seguintes índices zootécnicos para estabilização do rebanho, com intervalo de parto de 12 meses: mortalidade de vacas em lactação, vacas secas e de novilhas





(taxa de 1% por ano); de bezerras e bezerras (taxa de 4% por ano). O modelo foi calibrado para uma baixa capacidade de oferta de forragem em área de 150 hectares, correspondente a 1,16 UA/ha/ano. A estabilização do rebanho foi ajustada estimando-se as taxas de descarte (venda) de animais de todas as categorias. O modelo é flexível comportando outros valores para uso em experimentos *in silico*. As simulações do modelo Rebanho mimizam as situações reais de gestão promovendo o aprendizado, possibilitando experimentos *in silico* e auxiliando na tomada de decisão em sistemas de produção de bovinos.

Indicadores de resiliência

Quatro indicadores de resiliência (Dureza, Robustez, Rapidez de Recuperação e Elasticidade) propostos por Herrera (2017) e aplicados por Ambrósio et al. (2018) foram quantificados com base nos estoques de UA em cada categoria. Estes indicadores são atributos mensuráveis relacionados com a resiliência do sistema e que expressam o comportamento dos resultados desejados do sistema (animais no rebanho, produtos), assim definidos:

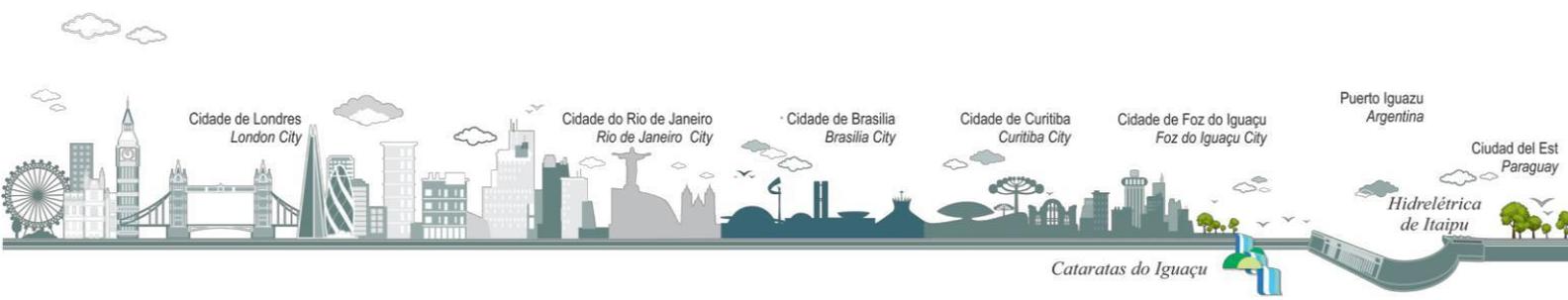
Dureza (σ_D) é a capacidade do sistema para resistir a um distúrbio (σ) sem apresentar uma mudança no desempenho dos resultados expressos na função $F(X)$. Quanto maior o valor da dureza, maior é o distúrbio necessário para produzir qualquer alteração no comportamento do sistema.

Robustez ($\bar{\rho}$) é a capacidade do sistema para suportar grandes distúrbios (σ) sem perda significativa de desempenho. Quanto mais robusto o comportamento da $F(X)$, menor é a mudança produzida pelo mesmo distúrbio.

Rapidez de Recuperação (\bar{R}) é a taxa média em que um sistema retorna ao equilíbrio após um distúrbio (σ). Quanto maior a \bar{R} , mais rápido o sistema recupera-se após o distúrbio.

Elasticidade (σ_E) é a capacidade do sistema para resistir a um distúrbio (σ) sem alterar para um estado estável diferente. Quanto mais elástico for o sistema, maior será o distúrbio que pode ser absorvido sem transformar para um regime alternativo.

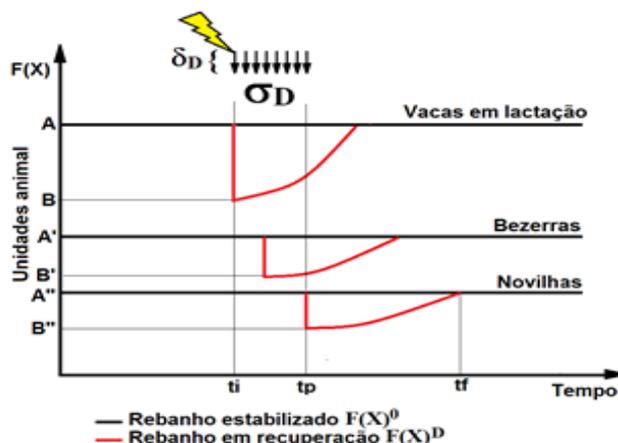
As quantidades de animais em cada categoria foram consideradas como resultados do sistema expressos por funções $F(X)$ quantificáveis e dependentes do tempo. A $F(X)_t$ do estoque de animais, em UA, tende a um patamar de estabilização do rebanho A , A' e A'' , Figura 3. Observe que o efeito direto do raio sobre a categoria de Vaca em lactação (A), por





hipótese dinâmica, gera efeito indireto (efeito dominó) nas categorias de Bezerra e Novilha.

Figura 3 - Exemplos de comportamento de $F(X)$. Sendo o estoque de animais no rebanho sem distúrbio (linha preta, $F(X)^0$) e o comportamento do sistema com resposta hipotética dinâmica, em termos de UA por categoria animal no rebanho (linha vermelha, $F(X)^D$) para um distúrbio (σ_D , com magnitude (δ) e duração ($tp - ti$). Onde, (δ), magnitude; ti , tempo de início em que o distúrbio afeta o sistema; tp , tempo em que o distúrbio para de afetar o estoque de animais no rebanho; tf , tempo no qual o rebanho recupera a estabilidade; e σ_D , distúrbio que afeta o rebanho.



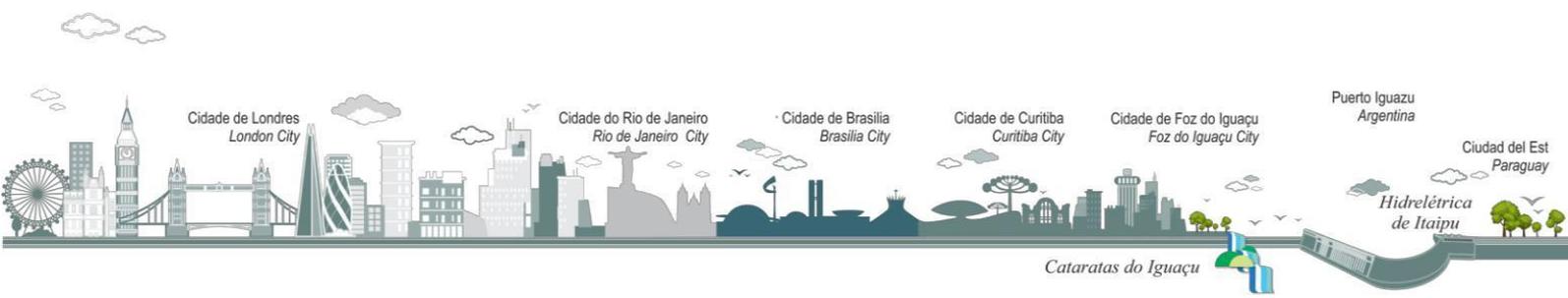
Fonte: Desenho modificado de Herrera (2017) modificado pelo autor.

Para medir os indicadores de resiliência para o comportamento de $F(X)$, Figura 3, os parâmetros foram estimados em experimentos *in silico* usando as seguintes equações, conforme Herrera (2017).

1) A função $F(X)$ é representada pelo estoque de animais em cada categoria animal, ao longo do tempo. O comportamento da $F(X)^0$ foi estimado no modelo computacional considerando que não há distúrbio por raio ($\delta = 0$). No cenário (C0), a curva da quantidade de animais no rebanho está estabilizada, representada por uma linha horizontal. A perda (morte e não reposição) de animais devido ao raio foi considerada como distúrbio (σ). O distúrbio (σ_D) foi calculado como a soma dos produtos das magnitudes dos distúrbios das n categorias animal (δ_j) e a duração do distúrbio ($tp - ti$) da respectiva categoria afetada direta ou indiretamente pelo raio, Equação (1).

$$\text{Distúrbio} \quad \sigma = \sum_{j=1}^{j=n} (\delta_j \times (tp - ti)_j) \quad \text{Equação (1)}$$

Há um prolongamento ao longo do tempo do efeito do raio sobre a quantidade total de





UA devido à demora que ocorre na mudança de categoria dos animais. Por isso, t_p é o tempo em que os efeitos do distúrbio param, em termos de perda de Novilha que é a última categoria animal afetada indiretamente pelo distúrbio do raio.

2) Nas simulações, o tempo de início (t_i) é o momento que ocorre o acidente por raio e t_p é o tempo em que param as perdas de animais por morte ou não reposição de animais. A $F(X)$ foi estimada em função da quantidade de UA em cada categoria animal do rebanho. Para medir a Dureza (σ_D) manteve-se em cada rodada de simulação o valor de t_i constante e modificou-se a magnitude do distúrbio (δ) ajustando manualmente o distúrbio (σ). O menor distúrbio (σ_D) é o que produz resultados diferentes ($F(X)^D \neq F(X)^0$). Observe, Figura 3, que a $F(X)^D$ se iguala a $F(X)^0$ no tempo t_f (restauração), para cada categoria animal. Este distúrbio (σ_D) representa a dureza do sistema calculada usando a Equação (2).

$$\text{Dureza} \quad \sigma_D = \delta_D \times (t_p - t_i) \quad \text{Equação (2)}$$

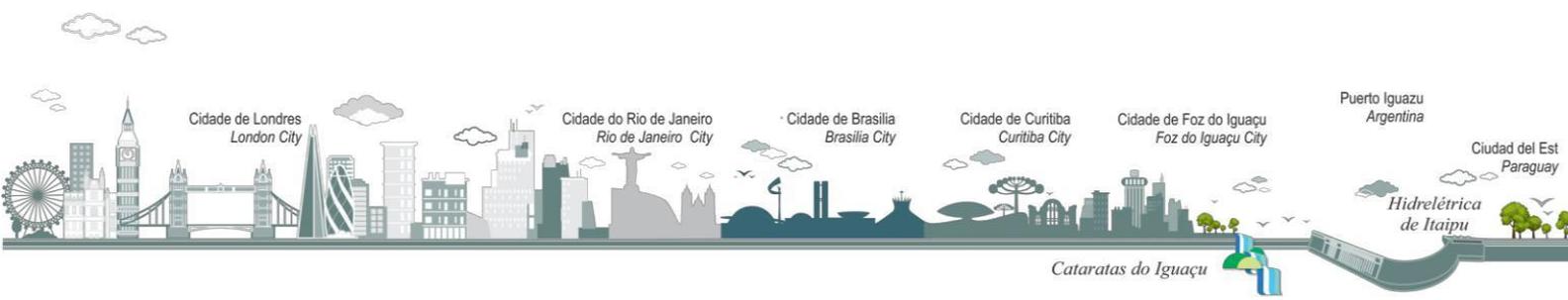
3) Executando novas simulações, aumentando a magnitude do distúrbio (δ) e mantendo t_i constante, determinadas pela estratégia de reposição adotada, gerou-se o comportamento $F(X)^E$ que não restaura o comportamento $F(X)^0$. Ou seja, com uma alta magnitude do distúrbio não se restaura a tendência original do comportamento do sistema. Assim, obteve-se o indicador Elasticidade (σ^E) que é o distúrbio que produz $F(X)^E$ (a quantidade de distúrbio necessária para mover o sistema para uma estabilização do rebanho diferente) calculada usando a Equação (3):

$$\text{Elasticidade} \quad \sigma_E = \delta_E \times (t_p - t_i) \quad \text{Equação (3)}$$

4) Para obter a estimativa para os índices Robustez ($\bar{\rho}$) e Rapidez de Recuperação (\bar{R}) da estabilização do rebanho, em cada rodada da simulação (diferentes δ ajustados manualmente), foram registrados os valores de δ , A, B, t_f e t_p usados nas Equações 4 e 5, para calcular \bar{R} e $\bar{\rho}$ como médias aritméticas dos valores obtidos nas rodadas de simulação em cada cenário.

$$\text{Rapidez de Recuperação} \quad \bar{R} = \frac{(A-B)}{(t_f - t_p)} \quad \text{Equação (4)}$$

$$\text{Robustez} \quad \bar{\rho} = \frac{\sigma}{(A-B)} \quad \text{Equação (5)}$$





Os valores de A e B, A' e B', A'' e B''' da F(X) foram estimados em função dos estoques de animais em todas as categorias afetadas direta ou indiretamente pelo distúrbio do raio. As médias de \bar{R} foram estimadas em termos de UA total do rebanho por tempo de recuperação.

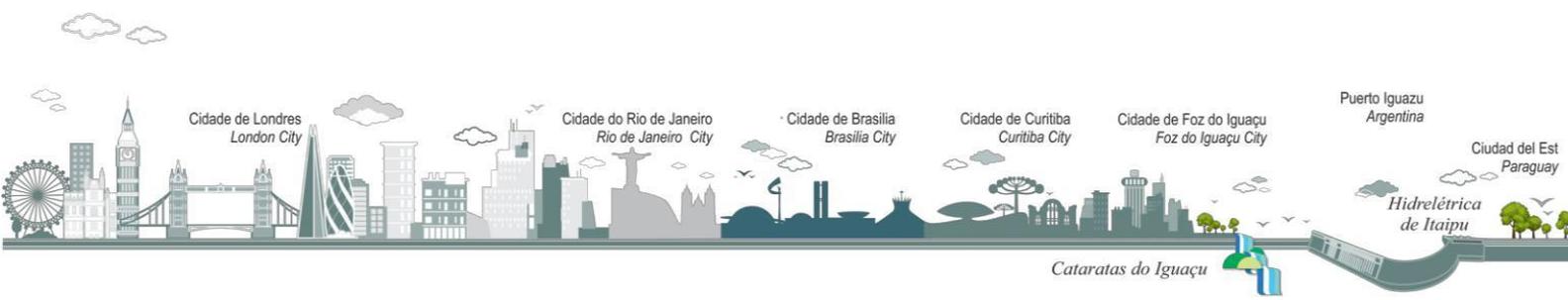
Deve-se notar que o procedimento de alterar manualmente os valores da magnitude do distúrbio (δ) em diversas rodadas de simulação consiste de um experimento *in silico* para gerar uma amostra de valores dos parâmetros usados nos cálculos dos indicadores de resiliência. Isto foi necessário devido à dificuldade de se obter tais valores com medições reais (a campo) com diferentes comportamentos de F(X) de resposta onde a magnitude do distúrbio não é controlada.

Para construir cenários supôs-se que um rebanho com estrutura estabilizada apresente quantidade de animais, em cada categoria, dimensionada em função da quantidade potencial de forragem ofertada em uma determinada área de pasto e da capacidade de produção de alimentos conservados (fenação e silagem) (LOPES et al., 2000; AMBRÓSIO et al., 2008).

A resiliência foi estimada considerando cinco cenários com diferentes magnitudes de distúrbios por raio: linha de base (C0, δ igual a zero), dureza (C1, menor δ), brando (C2, δ igual a 0,10), severo (C3, maior magnitude δ que se recupera a estabilidade) e transformação (C4, magnitude que não recupera estabilidade da linha de base).

O cenário linha de base (C0) da estrutura do rebanho estabilizada antes do distúrbio (δ igual a 0) foi projetado pelo modelo, supondo um rebanho com 186,25 UA, com taxas de descarte de vaca igual a 16,7%, descarte de bezerra igual a 12,0% e taxa de descarte, de novilha igual a 15,35%. O cenário de dureza C1 (δ igual a 0,01) foi construído para identificar o menor valor de distúrbio que afeta a estrutura do rebanho. Os valores dos parâmetros projetados neste cenário foram utilizados para o cálculo da dureza. O cenário brando C2 (δ igual a 0,10) foi construído para obter os efeitos de uma magnitude de distúrbio sobre a resiliência da estrutura do rebanho que pode ocorrer na prática. O cenário severo C3 (δ igual a 0,17) foi construído para identificar a maior magnitude do distúrbio que o sistema pode suportar e recuperar a estrutura da linha de base. Acima deste valor, tem-se o cenário C4 (δ igual a 0,18) no qual o sistema se transforma, não recuperando a estrutura do rebanho do cenário C0. Os parâmetros do cenário C4 foram usados para o cálculo da Elasticidade.

Nos experimentos *in silico* para construir cenários com diferentes magnitudes de distúrbio, foi escolhido o 15º ano como sendo o ano de ocorrência de acidente por raio. Neste





ano, o rebanho está estabilizado em valores considerados como linha de base.

O método aqui adotado fornece uma estrutura básica para análise de fenômenos similares que envolvem a perda de animais no rebanho como, por exemplo: devido as mudanças climáticas (ondas de calor, inundações, doenças) e devido causas antropogênicas (a morte e o sacrifício de animais por doenças ou acidentes em transporte e roubo ou venda emergencial de animais).

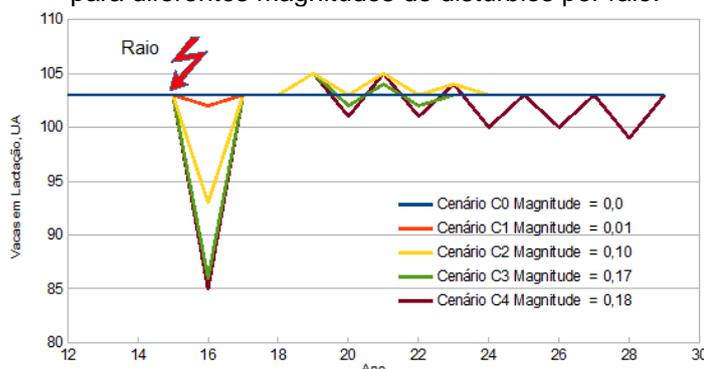
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cenários projetados

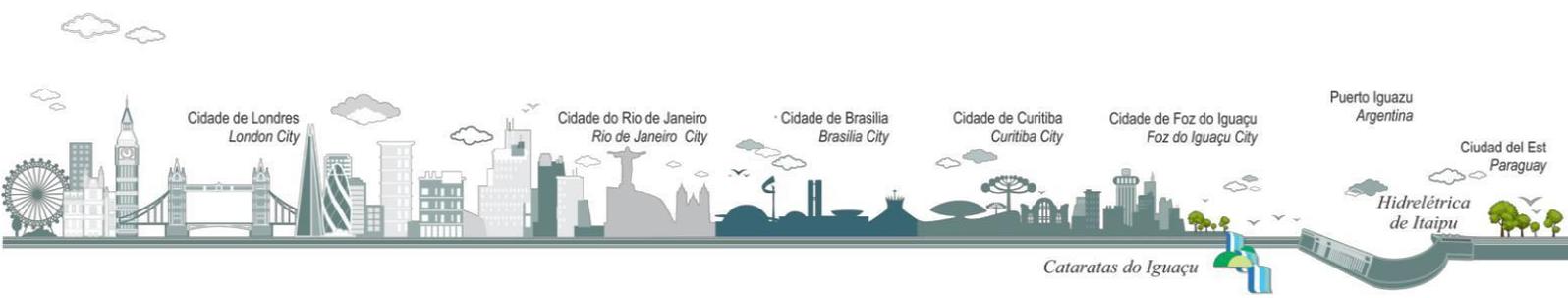
São apresentados os cinco cenários simulados para a estrutura do rebanho em função da magnitude do distúrbio causado por raio. Na Figura 4 são apresentadas as trajetórias das quantidades de unidade animal para a categoria de Vaca em lactação para estes cenários. A produção de leite total apresenta o mesmo padrão de trajetória deste gráfico se considerar uma produção média anual de leite por vaca em lactação.

As variações das UA simuladas, para cada categoria animal, com diferentes magnitudes de distúrbio são dependentes das taxas de aumento e diminuição da quantidade de animais usada para determinar a linha de base (C0). Assim, na prática, o modelo pode ser ajustado para qualquer estrutura de rebanho encontrada nos rebanhos leiteiros, permitindo obter informações para a construção da resiliência da bovinocultura leiteira.

Figura 4 - Dinâmica da quantidade de vacas em lactação, em UA, nos cenários (C0 a C4) projetados para diferentes magnitudes de distúrbios por raio.



Fonte: os autores, 2022.

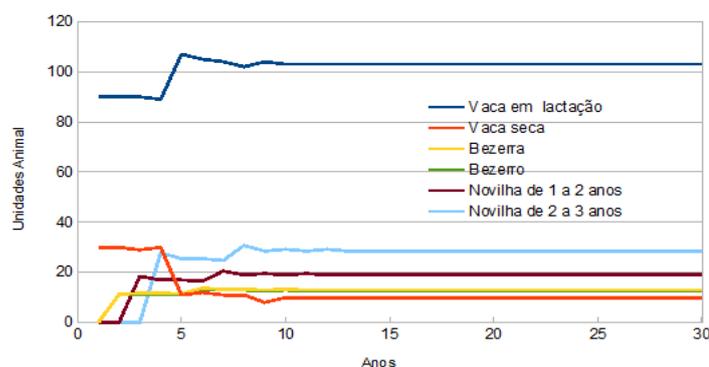




Cenário linha de base (C0)

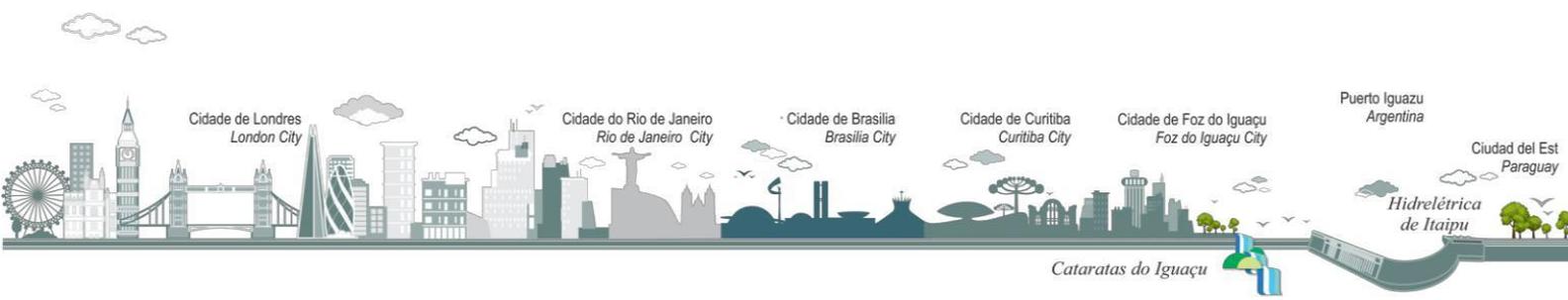
No cenário linha de base (C0) o modelo Rebanho projeta um rebanho com estrutura estabilizada.

Figura 5 - Quantidade de unidades animal por categoria animal do rebanho estabilizado no cenário linha de base (C0).



Fonte: os autores, 2022.

Na simulação do cenário linha de base, o rebanho estabilizou em nove anos, com um total de 174 unidades animal para produção (1,16 UA/ano), composto, em proporção do total de UA, por 8% de bezerro, 11% de novilhas de 1 a 2 anos, 17% de novilhas de 2 a 3 anos, 59% de vacas em lactação e 6% de vacas secas, Figura 5. Houve o descarte anual de 100 animais sendo 51 bezerros, cinco novilhas de 2 a 3 anos, 20 novilhas de 3 a 4 anos, 18 vacas e seis bezerras. Na análise da dinâmica da evolução das categorias animal, verificou-se que no terceiro ano o modelo produziu uma queda abrupta na curva referente à quantidade UA de vacas secas devido à taxa de substituição de animais problemas associada com a venda de vacas e a entrada de vacas primíparas prenhas que só iniciam a lactação com idade de quatro anos. Isto ocorreu devido à simulação ser executada em passo anual (unidade de tempo). A simulação do modelo projetou para o sétimo ano a estabilização no descarte de bezerros, bezerras e novilhas de 1 a 2 anos. As estabilizações no descarte de vacas secas e novilhas de 2 a 3 anos ocorreram no nono ano. No sétimo ano também ocorreu estabilização da quantidade de vacas primíparas e múltíparas em lactação. O modelo permite, ainda, fazer experimentos in silico simulando cenários com diversos critérios de descarte de animais e





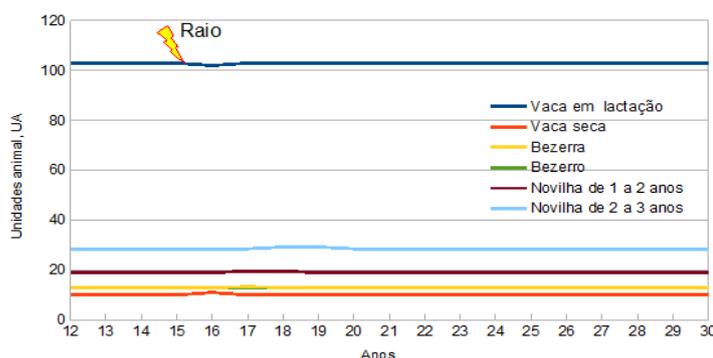
alterações nos índices zootécnicos gerando estimativas de produção de leite e de animais vendidos, inclusive possibilitando o cálculo da renda bruta do rebanho estabilizado.

Cenário (C1) da estrutura do rebanho para a menor magnitude que causa distúrbio devido ao raio

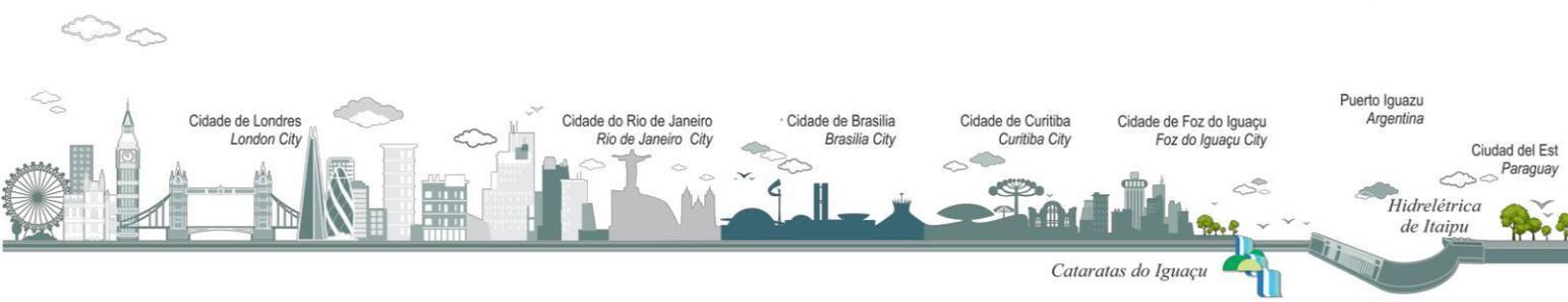
Experimentos in silico com o modelo Rebanho aumentando gradativamente o valor da magnitude a partir do valor zero (ausência de distúrbio), em busca do valor para o indicador dureza, indicou que ocorre alteração na estrutura do rebanho estabilizado, conforme a linha de base do C0, a partir da magnitude do distúrbio igual a 0,01. No caso, a alteração resultou na morte de uma UA de vaca em lactação substituída por uma vaca seca que seria descartada no mesmo ano, além da perda de uma cria no ano seguinte, Figura 6. Na ocorrência de nascimento de fêmea haveria alteração de uma UA na categoria de novilha nos anos 2 e 3 após acidente com o raio. Assim, a estrutura do rebanho se estabiliza em 3 anos (tf igual a 18) após o distúrbio por raio. Embora a perda seja mínima, evitar a exposição dos animais aos acidentes por raios é uma ação de construção de resiliência climática da bovinocultura leiteira que eleva o padrão ético da pecuária.

Figura 6 - Quantidade de unidades animal por categoria animal do rebanho estabilizado no cenário (C1) de menor magnitude do distúrbio por raio que altera a linha de base da estrutura do rebanho.

Sendo: tempo de início (ti) 15º ano, tempo de parar distúrbio (tp) 17º ano e tempo final (tf) de recuperação 18º ano.



Fonte: os autores, 2022.

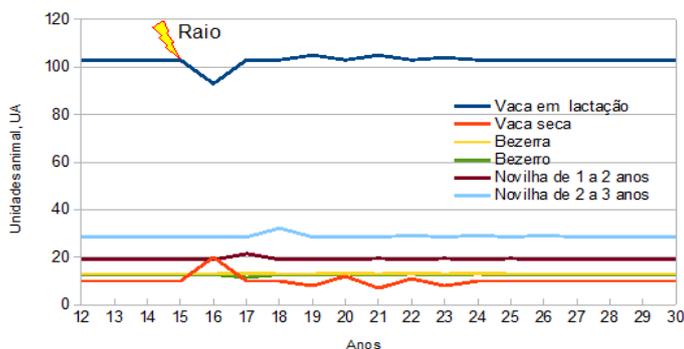




Cenário (C2) brando com distúrbio de magnitude 0,1 devido ao acidente com raio

No cenário brando (C2) com magnitude do distúrbio igual a 0,10, Figura 7, resultou na morte de 10 UA de vacas em lactação por raio no 15º ano, escolhido como tempo inicial (ti) do distúrbio. Como consequência, no 16º ano deixaram de ser descartadas (vendidas) 10 vacas (10 UA), 4 bezerras (1,0 UA) e 5 novilhas (2,50 UA), como estratégia contida no modelo para recompor os animais que vieram a óbito. Também houve a projeção da diminuição na produção de leite em 50.000 kg/ano no período entre 15º e 16º ano, estimativa com base na média de 5.000 kg de leite/vaca/ano. Como efeito dominó ao logo do tempo, o distúrbio causado pelo raio no cenário C2, gerou desequilíbrio na estrutura do rebanho durante 11 anos (tf no 26º ano) até ser estabilizado conforme o cenário linha de base.

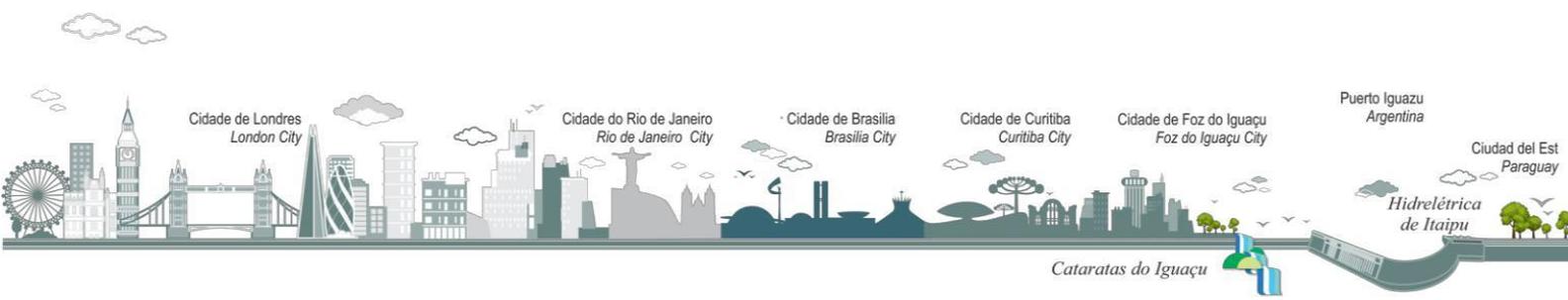
Figura 7 - Unidades animal nas categorias do rebanho após acidente com raio com distúrbio de magnitude 0,10 direto sobre as vacas em lactação, Cenário Brando (C2). Observar que as UA das categorias aumentam devido à decisão de reter animais que seriam descartados.



Fonte: os autores, 2022.

Cenário (C3) com distúrbio de magnitude 0,17 devido ao raio

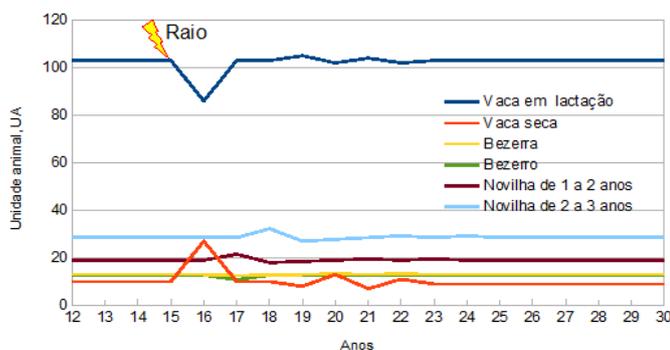
Experimentos in silico com o modelo Rebanho indicaram que a maior magnitude do distúrbio em que o rebanho recupera a estabilidade da estrutura da linha de base foi igual a 0,17, Figura 8. No caso, a alteração resultou na morte de 17 UA de vacas em lactação que conforme a estratégia adotada no experimento foram substituídas por vacas que seriam descartadas no mesmo ano que ocorreu o acidente com raio (ti igual a 15). Como





consequência do processo de estabilização do rebanho, deixaram de ser descartadas 17 vacas, 6 bezerras e 5 novilhas. Também houve diminuição na produção de leite em 85.000 kg no período de um ano e nas projeções para seis anos seguintes a produção de leite anual flutuou em função da variação na quantidade de vacas em lactação entre 102 e 105 UA. Neste cenário severo de distúrbio causado pelo raio a perda total foi igual a 11,75 UA e houve recuperação da estabilidade da estrutura do rebanho inicial da linha de base após nove anos (tf igual a 24).

Figura 8 - Unidades animal nas categorias do rebanho após acidente com raio para o cenário (C3) com distúrbio de maior magnitude (0,17) em que o rebanho pode recuperar a estabilidade da linha de base (C0).

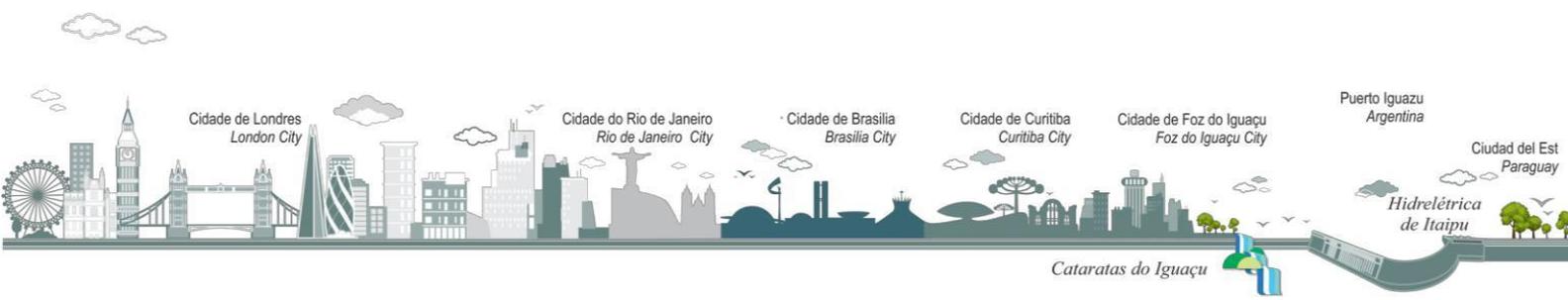


Fonte: os autores, 2022.

Cenário (C4) com distúrbio de magnitude 0,18 devido ao raio

No cenário severo (C4) com magnitude do distúrbio igual a 0,18, Figura 9, houve morte por raio de 18 vacas em lactação (18 UA) no 15º ano (ti). Como consequência, deixaram de ser descartadas 18 vacas. A estabilidade do rebanho conforme o cenário de linha de base (C0) não é recuperada adotando apenas a estratégia de reter vacas que seriam descartadas, quando ocorre um distúrbio com magnitude igual ou maior que 0,18. Nesta condição, a estabilização do rebanho entra em colapso com diminuição contínua de animais no rebanho.

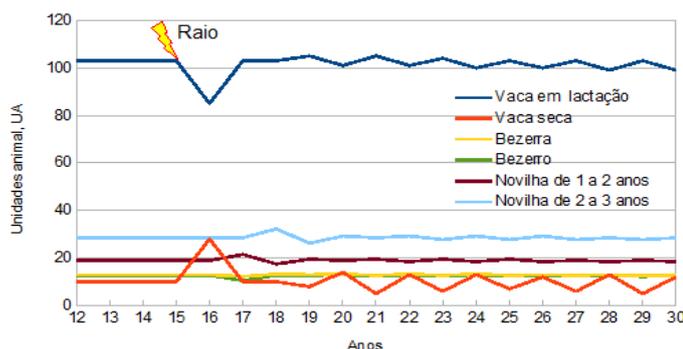
Perder a resiliência nesta magnitude de 0,18 é preocupante considerando a possibilidade de fulminação de bovinos leiteiros na ordem de até 53% (magnitude de 0,53) dos animais da propriedade em um único evento. A desestabilização provocada na estrutura





do rebanho geraria ineficiências no manejo e perdas econômicas irrecuperáveis, considerando a estratégia de adotada na reposição de animais.

Figura 9 - Unidades animal nas categorias do rebanho após raio com distúrbio de magnitude 0,18 direto sobre as vacas em lactação (C4). Com magnitude do distúrbio igual ou maior que 0,18 não há restauração da estabilidade da estrutura do rebanho na linha de base (C0).

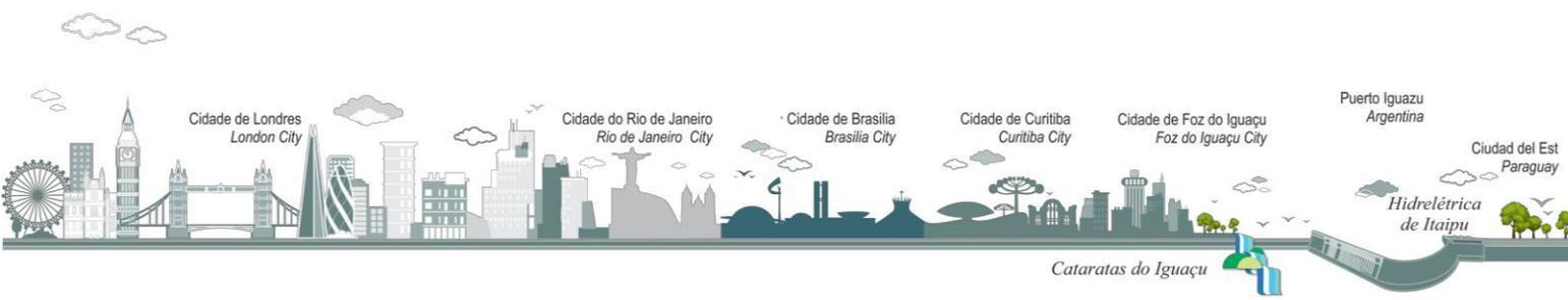


Fonte: os autores, 2022.

Indicadores de resiliência

Apresentamos os valores dos indicadores de resiliência calculados em função da diferença entre os parâmetros das funções $F(X)^0$ e $F(X)^D$ representadas pela dinâmica dos estoques de animais em UA nas categorias animal afetadas direta e indiretamente pelo raio em diferentes cenários de distúrbios, ao longo do tempo.

Dureza. A magnitude de distúrbio (δ_D) igual a 0,01 foi a de menor intensidade que produziu uma função de resultado diferente ($F(X)^D \neq F(X)^0$). Ou seja, provocou a modificação na estrutura do rebanho, em termos de UA, para o acidente por raio ocorrido no tempo t_i igual a 15. O tempo em que o distúrbio parou de afetar as categorias de animais foi de 3 anos (t_p igual a 18) porque o rebanho possuía um estoque de animais (que em condições normais seriam descartados) suficiente para repor a perda devido a este distúrbio. O distúrbio por raio equivaliu a perda de uma vaca em lactação (1 UA) com reposição no ano seguinte. Mas, o efeito se propagou pela necessidade de reposição de uma bezerra (0,25 UA) e de uma novilha (0,5 UA) para que o rebanho voltasse a estabilizar em 4 anos (t_f igual a 19, tempo de restauração) após o acidente com raio. Então, a dureza da estrutura do rebanho σ_D foi igual

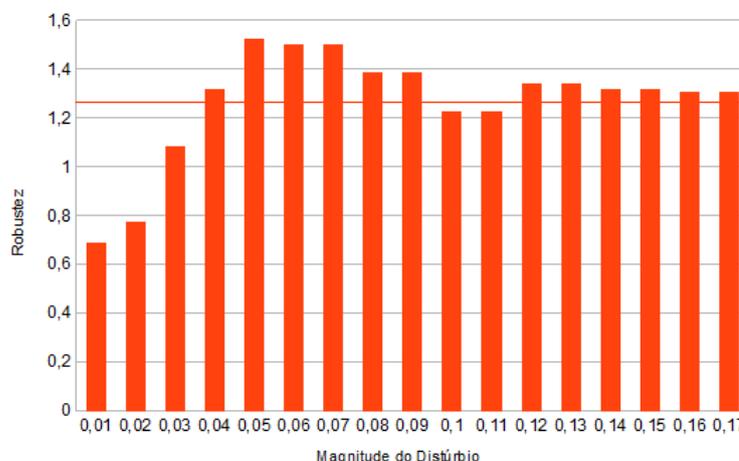




a 0,01. Considerando a escala da magnitude do distúrbio entre 0 a 1, este valor simulado indica dureza extremamente baixa, praticamente nula, significando que a estrutura do rebanho será afetada quando houver incidência de raio sobre os animais. A principal estratégia a ser adotada para aumentar a resiliência é a prevenção mitigando os fatores de risco. Investir em aterramento e isolamento de cercas, impedir o acesso de animais as copas de árvores isoladas, retirar animais de locais elevados e manter animais em abrigos protegidos durante tempestades com raio. Deve-se considerar que os bovinos não desenvolvem comportamentos para responder aos raios por não ter possibilidade de aprendizagem por repetição do evento devido à morte fulminante dos animais.

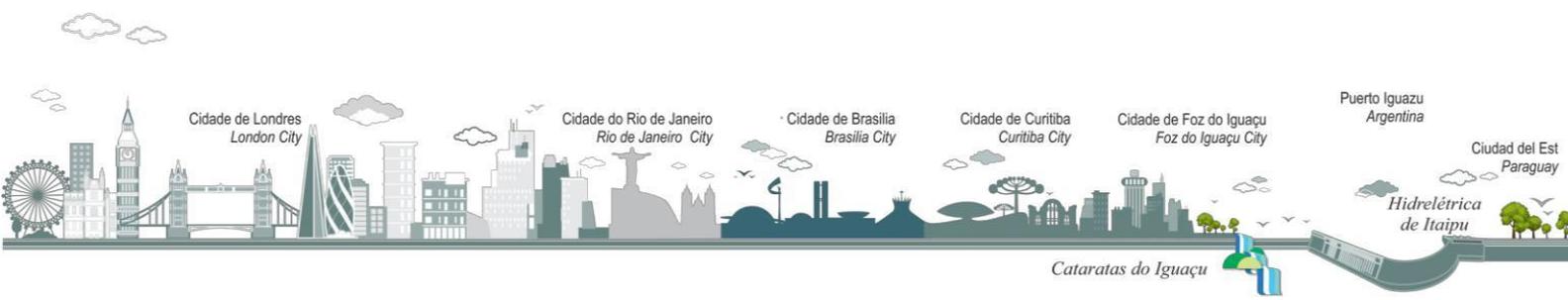
Robustez. A Robustez (\bar{p}) do sistema de produção para a estabilização do rebanho calculada considerando os estoques de animais de todas as categorias afetadas direta e indiretamente foi igual a 1,27, calculada como a média dos índices de Robustez afetados pelas variações nas UA totais correspondentes as magnitudes de distúrbio entre 0,01 e 0,17, Figura 10.

Figura 10 - Robustez da estrutura do rebanho para magnitudes de distúrbio por raio entre 0,01 e 0,17.



Fonte: os autores, 2022.

Observa-se (Figura 10) que a estrutura do rebanho sob a estratégia adotada para reposição de animais é mais robusta e, portanto, mais resiliente aos distúrbios no intervalo de 0,05 a 0,07 cujos valores estão acima da média. As flutuações nos valores simulados da Robustez são indícios de não linearidade e mostram a resposta da estratégia baseada na

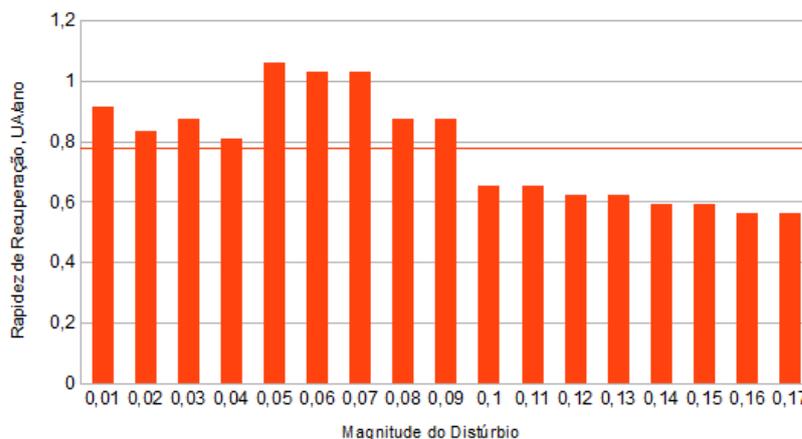




reposição de uma única categoria animal. Este indicador, estimado em termos de UA total do rebanho, é útil quando se comparam rebanhos diferentes ou alterações significativas nas práticas de manejo de um rebanho. Assim, para um mesmo distúrbio o sistema de produção mais robusto (com maior valor de $\bar{\rho}$) apresentaria maior capacidade de manter a estrutura do rebanho observada no estado inicial (C0).

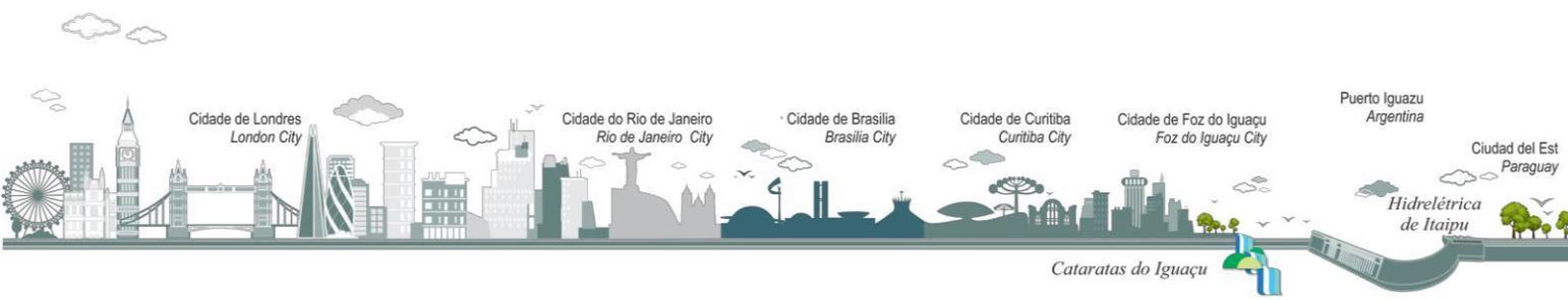
Rapidez de Recuperação. A Rapidez de Recuperação média da estrutura do rebanho foi de 0,77 UA/ano, Figura 11. Como era de se esperar este indicador varia em função de diferentes magnitudes de distúrbios, para um mesmo rebanho e mesma estratégia de reposição de animais. Para magnitudes até 0,09 a Rapidez de Recuperação foi acima da média. Para as magnitudes de 0,01 a 0,03 o tempo final (tf) variou de 4 a 9 anos e para magnitudes maior ou igual 0,04 o tempo final foi igual a 11 anos.

Figura 11 - Rapidez de Recuperação da estrutura do rebanho para magnitudes de distúrbio por raio entre 0,01 e 0,17.



Fonte: os autores, 2022.

A rapidez com que o rebanho recupera sua estrutura ótima ou desejada é uma característica considerada na gestão de sistemas de produção de leite. Quanto maior a rapidez da recuperação (UA/ano), mais rápido o sistema recupera a estrutura do rebanho após o distúrbio e, portanto, o rebanho é mais resiliente a perda de animais por raio. Assim, estratégias resilientes repõem rapidamente as perdas de animais, por meio de compra e não vendendo animais de categorias afetadas ao longo do tempo, isto pode ser testado no modelo





Rebanho. Fixando uma estratégia de reposição de animais, a quantidade de animais afetados, representando as UA perdidas antes e até o distúrbio parar ($A - B''$), foi a variável que mais influenciou a rapidez de recuperação da estrutura do rebanho.

Elasticidade. A elasticidade da estrutura do rebanho (σ_E) igual a 0,54 foi estimada para a magnitude do distúrbio (δ) de 0,18. A duração do distúrbio de raio (t_p) considerando o efeito dominó sobre as categorias de animais, foi igual a três anos quando começou a afetar a quantidade de animais da categoria Novilha de 2 a 3 anos. A elasticidade da estrutura do rebanho varia com diferentes condições de rebanhos e estratégias adotadas na reposição de animais que movem o sistema para um equilíbrio diferente que não restaura a estabilização da estrutura do rebanho existente antes do acidente com raio.

Na prática, a estrutura de rebanho é mais resiliente quanto maior for a elasticidade, assim, cessando os efeitos do distúrbio, inicia-se a recuperação do sistema cuja elasticidade deve ser alta, para alcançar o padrão da linha de base antes do distúrbio.

CONCLUSÕES

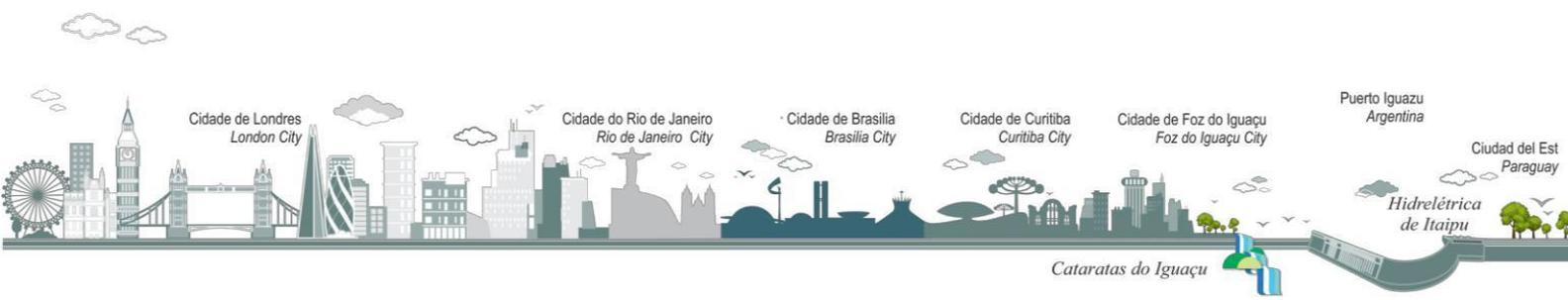
A estrutura do rebanho leiteiro afetada por morte súbita de animais devido a acidentes por raio ou outro evento similar causa um efeito dominó, com demoras ao longo dos anos, sobre a UA das categorias de animais do rebanho.

O modelo permitiu calcular a resiliência da estrutura do rebanho considerando os efeitos dominó dos distúrbios causados por raios sobre as categorias dos animais.

A resiliência da estrutura do rebanho aos distúrbios por raios é dependente das condições do rebanho e das estratégias adotadas na reposição dos animais afetados.

A dureza indicou baixa resiliência da estrutura do rebanho aos raios. Sugerindo a necessidade de adotar práticas de proteção dos animais durante as tempestades.

Ocorrendo acidentes que desestabilizam a estrutura do rebanho é possível adotar estratégias de reposição da categoria afetada junto com reposição de animais de outras categorias para aumentar a resiliência dimensionada pelos indicadores de Rapidez de Recuperação, Robustez e Elasticidade.





AGRADECIMENTO: os autores agradecem a Fundação de Apoio à Pesquisa de São Paulo - FAPESP (Processo 2014/04416-0) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, G. **Raio atinge árvore e mata 12 vacas que se abrigavam da chuva.** G1 Rio Preto e Araçatuba. 2016. Disponível em: <https://g1.globo.com/sao-paulo/sao-jose-do-rio-preto-aracatuba/noticia/2016/04/raio-atinge-arvore-e-mata-12-vacas-que-se-abrigavam-da-chuva.html>. Acesso em: 10 mar 2021.

AMBRÓSIO, L.A.; CAMPOS, F.P.; SARMENTO, P. **Modelagem de ecossistema planta-animal na produção de leite.** In: 45a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia. Lavras, MG, Brasil: UFLA, 2008.

AMBRÓSIO, L.A.; TOLEDO, L.M.; DEMSKI, J. Operacionalização do conceito de resiliência de forrageiras sob pastoreio rotativo aos distúrbios de mudanças climáticas. **Boletim de Indústria Animal**, v. 75, n. 1, p.1-15, 2018. <https://doi.org/10.17523/bia.2018.v75.e1418>

CAMPOS, F.P.; SARMENTO, P.; AMBRÓSIO, L.A. **Modelo dinâmico para simulação da estabilização da estrutura do rebanho de bovinos de leite.** In: 46a Reunião da Sociedade Brasileira de Zootecnia. Maringá, Brasil: SBZ, 2009. p.162-165.

ELAT. Grupo de Eletricidade Atmosférica. **Mortes por raios.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2021. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/protecao/cartilha.de.protecao.contra.raios.php>. Acesso em: 08 abr 2021

FIGUEIRÓ, K. **Raio mata 16 vacas em propriedade do Oeste.** Rede PEPERI. 2020. Disponível em: <https://www.peperi.com.br/noticias/14-04-2020-raio-mata-16-vacas-em-propriedade-do-oeste/>. Acesso em: 20 abr 2021.

GOTTSCHALL, C.S.; CANELLAS, L.C.; ALMEIDA, M.R.; MAGERO, J.; BITTENCOURT, H.R. Principais causas de mortalidade na recria e terminação de bovinos de corte. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 8, n. 1, p. 327-332, 2010.

HERRERA, H. From Metaphor to Practice: Operationalizing the Analysis of Resilience Using System Dynamics Modelling. **Systems Research and Behavioral Science**, v. 34, n. 1, p.444–462, 2017.

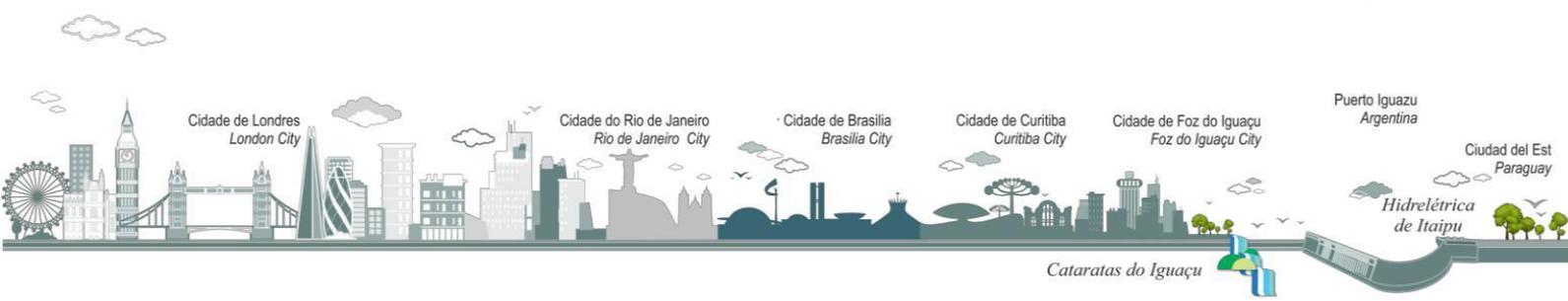
LIMA, B.G.V.; COSTA, V.M.; VIANA, R.B. Acidentes por fulguração em bovinos. **PetVet Radar: Difusão e Comunicação PETVet/Ufra**, v. 1, n. 2, 2017.

LOPES, M.A.; VIEIRA, P.F.; CASTRO NETO, P.; MALHEIROS, E B. Desenvolvimento de um sistema computacional para dimensionamento e evolução de rebanhos bovinos. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v. 29, n. 1, p.1511-1519, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982000000500033>.

OLIVEIRA, M. **Raio mata 103 bois e deixa prejuízo de R\$ 130 mil a fazendeiro de Rondônia.** G1 Cacoal e Zona da Mata. 15/03/2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/ro/cacoal-e-zona-da-mata/noticia/raio-mata-103-bois-e-deixa-prejuizo-de-r-130-mil-a-fazendeiro-de-rondonia.ghtml>. Acesso em: 08 mar 2021

PETERSON, R.A. **Carga animal e intensidade de pastoreio.** São Paulo: Instituto de Zootecnia, 1961. p.109-112.

PINTO Jr., O. **ELAT/INPE levanta dados de mortes de gados por raios.** São José dos Campos:





Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2021.

Disponível em:

<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/elat.na.midia.php?ano=&cat=1&page=7>. Acesso em 02 abr 2021.

PINTO JR., O; PINTO, I.R.C.A. **Tempestades e Relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 185 p.

PINTO JR., O.; PINTO, I.R.C.A. Lightning Changes in Response to Global Warming in Rio de Janeiro, Brazil. **American Journal of Climate Change**, v. 9, n. 1, p.266-273, 2020.

PINTO JR., O.; PINTO, I.R.C.A; PINTO NETO, O. Lightning Enhancement in the Amazon Region Due to Urban Activity. **American Journal of Climate Change**, v. 2, n. 1, p. 270-274, 2013.

SANTOS, A.P.P.; PINTO JÚNIOR, O.; SANTOS, S.R.Q.; LIMA, F.J.L.; SOUZA, E.B.; MORAIS, A.A.R.; ÁVILA, E.E.; PEDERNEIRA, A. Climatic Projections of Lightning in Southeastern Brazil Using CMIP5 Models in RCP's Scenarios 4.5 and 8.5. **American Journal of Climate Change**, v. 6, n. 1, p. 539-553, 2017. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.63027>.

SANTOS, A.P.P.; PINTO JÚNIOR, O.; SOUZA, E.B.; AZAMBUJA, R.; LIMA, F.J.L.; SANTOS, S.R.Q. Eventos climáticos extremos de descargas atmosféricas sobre o Estado de São Paulo. Parte I: aspectos anuais e sazonais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p.1346-1356, 2016a. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160092>

SANTOS, A.P.P.; PINTO JÚNIOR, O.; SOUZA, E.B.; AZAMBUJA, R.; LIMA, F.J.L.; SANTOS, S.R.Q. Eventos climáticos extremos de descargas atmosféricas sobre o Estado de São Paulo. Parte II: Aspectos mensais e frequências em múltiplas escalas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 2179-2187, 2016b. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160154>

SCHIAVONI, E. **Raio atinge fazenda no interior de São Paulo e mata 84 bois**. UOL 2018.

Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2018/01/04/raio-atinge-fazenda-no-interior-de-sao-paulo-e-mata-84-bois.html>. Acesso em: 08 mar 2021.

STERMAN, J.D. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. USA: Chicago, IL. McGraw Hill Companies; 2000. 982 p.

WATANABE, T.T.N.; FERREIRA, H.H.; GOMES, D.C.; PEDROSO, P.M.O.; OLIVEIRA, L.G.S.; BANDARRA, P.M.; ANTONIASSI, N.A.B.; DRIEMEIER, D. Fulguração como causa de morte em bovinos no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 30, n. 1, p. 243–245, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-736X2010000300009>

