RAUL OSSADA

Modelagem de medidas de controle em redes de movimentação de animais

São Paulo

2015

RAUL OSSADA

Modelagem de medidas de controle em redes de movimentação de animais

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Epidemiologia Experimental Aplicada às Zoonoses da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências

Departamento:

Medicina Veterinária Preventiva e Saúde Animal

Área de concentração:

Epidemiologia Experimental Aplicada às Zoonoses

Orientador:

Prof. Dr. Marcos Amaku

De acordo:

Orientador

São Paulo
2015

Obs: A versão original se encontra disponível na Biblioteca da FMVZ/USP

Autorizo a reprodução parcial ou total desta obra, para fins acadêmicos, desde que citada a fonte.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

(Biblioteca Virgínie Buff D'Ápice da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo)

T.3176
FMVZ

Ossada, Raul
Modelagem de medidas de controle em redes de movimentação de animais / Raul Ossada. --
2015.
103 p. : il.

Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia. Departamento Medicina Veterinária Preventiva e Saúde Animal, São Paulo, 2015.

Programa de Pós-Graduação: Epidemiologia Experimental Aplicada às Zoonoses.

Área de concentração: Epidemiologia Experimental Aplicada às Zoonoses.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Amaku.

1. Redes complexas. 2. Movimentação de animais. 3. Bovinos. 4. Modelagem epidemiológica. 5. Espalhamento de doenças. I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA

Comissão de Ética no uso de animais

CERTIFICADO

Certificamos que o Projeto intitulado "Modelagem de medidas de controle em redes de movimentação de animais", protocolado sob o nº 2251/2011, não utilizando animais, sob a responsabilidade do(a) Prof. Dr. Marcos Amaku, está de acordo com os princípios éticos de experimentação animal da "Comissão de Ética no uso de animais" da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo e foi aprovado em reunião de 22/6/2011.

We certify that the Research "Modeling control measures in networks of animal movements", protocol number 2251/2011, not using animals, under the responsibility Prof. Dr. Marcos Amaku, agree with Ethical Principles in Animal Research adopted by "Ethic Committee in the use of animals" of the School of Veterinary Medicine and Animal Science of University of São Paulo and was approved in the meeting of day 06/22/2011.

São Paulo, 27 de junho de 2011.

Profa. Dra. Denise Tabacchi Fantoni
Presidente

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Nome: OSSADA, Raul

Título: Modelagem de medidas de controle em redes de movimentação de animais

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Epidemiologia Experimental Aplicada às Zoonoses da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências

Data: ____/____/____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Julgamento: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Yoko Saito Ossada, ao meu pai Oswaldo Ossada e ao meu irmão Helder Ossada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Marcos Amaku, por sua grande paciência e compreensão (afinal me aguentar deste a época da graduação no BMAC não deve ter sido uma tarefa fácil), sem os quais esse trabalho demoraria muito mais para se concretizar.

Agradeço aos membros da banca pelas contribuições no enriquecimento deste trabalho.

Agradeço à família do professor Marcos por emprestarem ele um pouquinho, principalmente nos momentos finais da redação deste trabalho.

Agradeço ao pessoal do grupo de redes: Marcos Amaku, Rísia Lopes Negreiros, José Henrique de Hildebrand e Grisi-Filho, Rafael Ishibashi Cipullo e Fernando Silveira Marques, pelos ensinamentos tanto relacionados com o trabalho quanto na vida.

Agradeço à galera do LEB das gerações atuais, passadas e futuras: Alice de Carvalho Frank, (Tia) Aline Gil Alves Guilloux, Ana Pérola Drulla Brandão, Ana Rita Pinheiro Marques, Camila Marinelli Martins, Dejelina Ramona Gomez Gonzalez, Fernando Silveira Marques, Gina Paola Polo Infante, Guilherme Basseto Braga, Isabella Fontana, Jason (gatinho/luz do laboratório) Onell Ardila Galvis, Karina Diniz Baumgarten, Mariana Ramos Queiroz, Mônica Romero Solorio, Oswaldo Santos Baquero, Tatiana Jimenez Villegas, Vanessa Aparecida Feijó de Souza, Ana Julia Silva Alves, Anaiá da Paixão Sevá, Carolina Ballarini Zetun, Fernanda Ywasaki, Jean Carlos Ramos da Silva, Ligia Issberner Panachão, Mauro Riegert Borba, Rafael Ishibashi Cipullo, Renato Akio Ogata, Ricardo Souza Costa Barão de Aguiar, Risia Lopes Negreiros, Rita de Cássia Maria Garcia, Rosely Bianca dos Santos Kuroda (Bib's) e Sidnei Miyoshi Sakamoto, com os quais tive a oportunidade de conviver, mesmo que por pouco tempo e aprender, mesmo que só 1%, nesses anos todos de LEB. (Peço desculpas se o seu nome não consta aqui, mas não se sinta excluído, o problema é que a minha memória já não é mais tão boa).

Agradeço à galera dos outros laboratórios do VPS, com os quais tive a oportunidade de adquirir diversos conhecimentos.

Agradeço aos bons funcionários e professores do VPS, que são fundamentais para o bom andamento do departamento.

Agradeço aos funcionários da biblioteca e da pós-graduação, cuja colaboração foi fundamental para o cumprimento do prazo deste trabalho.

Agradeço à Simone Mariko Siguematu e à sua família, por aturarem esse pós-graduando que tanto demora para se tornar um assalariado com carteira de trabalho assinada.

Agradeço aos funcionários da polícia federal, sem os quais eu não teria levado parte dos resultados deste trabalho para um congresso, devido à um grande descuido meu (Sempre verifique a data de validade do seu passaporte, ela expira).

Agradeço à turma do RPG, do Etapa, da natação, da corrida, da ginástica olímpica, do Krav-magá, da musculação, por todos os momentos de lazer, esforço e descontração que passamos e ainda passaremos juntos.

Agradeço ao 1 segundo extra, pois toda ajuda é válida quando o prazo está acabando.

Agradeço a todos que esqueci de mencionar e que ajudaram direta ou indiretamente na conclusão deste trabalho, pois foi com a colaboração de vocês que este trabalho chegou ao seu fim.

Agradeço a você que, por qualquer que seja o motivo, está lendo este trabalho.

Por fim, agradeço aos autores das seguintes frases, pois estas apresentam de forma resumida lições que levarei para toda minha vida:

“Todos temos problemas, mas todos temos a capacidade de encontrar as soluções”.

“Feliz é aquele que aprende com o erro dos outros”.

“A omissão incentiva a corrupção”.

“Não crie um problema onde não existe nenhum problema”.

“Baby steps to giant strides” (“Passos de bebês para passos de gigante”, tradução livre).

Agradeço à FAPESP pelo apoio financeiro.

RESUMO

OSSADA R. **Modelagem de medidas de controle em redes de movimentação de animais.** [Modeling control measures in networks of animal movements]. 2015. 103 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

A movimentação de animais em uma rede de fazendas e o espalhamento de algumas doenças animais estão intrinsecamente relacionados. Assim, compreender a dinâmica do espalhamento de doenças infecciosas nestas redes é um instrumento importante no controle dessas doenças. Usando as informações sobre as movimentações de bovinos no estado de Mato Grosso, Brasil, em 2007, reconstruiu-se a rede de trânsito e a rede de proximidade geográfica entre os estabelecimentos desse estado, além de redes hipotéticas seguindo os modelos de rede Molloy-Reed, Kalisky, Método A e Método B, onde simulou-se, usando diferentes configurações do modelo SLIRS, o espalhamento de doenças com parâmetros hipotéticos e reais (brucelose e febre aftosa). Além disso, simulou-se o controle do espalhamento dessas doenças considerando o controle por imunização e por restrição, com e sem rearranjo das movimentações após a restrição, selecionando os estabelecimentos a serem protegidos de forma aleatória, baseando-se no grau de movimentação dos animais e utilizando o conceito do paradoxo da amizade. Dentre os resultados, destacam-se que apesar dos padrões das curvas de prevalência nas redes hipotéticas serem semelhantes aos da rede real, os valores observados foram maiores nas redes hipotéticas, indicando que utilizá-las no planejamento de políticas de controle de doenças no lugar da rede real pode levar a um maior uso de recursos do que seria necessário. Além disso, no controle das doenças tanto com parâmetros hipotéticos quanto com parâmetros reais, nas simulações usando apenas a rede de trânsito dos animais, observou-se uma redução mais efetiva da prevalência ao se selecionar os estabelecimentos com maior grau total do que a da seleção aleatória, enquanto que nas simulações que consideraram a rede de proximidade geográfica dos estabelecimentos, a redução na prevalência das estratégias que selecionaram estabelecimentos específicos foram semelhantes aos da seleção aleatória. Sobre o efeito do rearranjo das movimentações, observou-se que este pode facilitar o espalhamento de doenças na rede, mesmo nas situações em que se aplica alguma estratégia de controle. Espera-se que os resultados das simulações matemáticas possam contribuir para a discussão do impacto relativo entre as estratégias de controle mencionadas e que futuramente possam

auxiliar nas atividades dos órgãos responsáveis pela vigilância epidemiológica e no desenvolvimento de políticas de prevenção e controle de doenças em animais.

Palavras-chave: Redes complexas. Movimentação de animais. Bovinos. Modelagem epidemiológica. Espalhamento de doenças.

ABSTRACT

OSSADA R. **Modeling control measures in networks of animal movements**. [Modelagem de medidas de controle em redes de movimentação de animais]. 2015. 103 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

The animals' movements in a farms network and the spread of some animal diseases are intrinsically related. Therefore, comprehending the dynamics of the spreading of infectious diseases in these networks is an important tool in controlling these diseases. Using the information about the bovine movements from the State of Mato Grosso, Brazil, in 2007, we rebuilt the network of animal movements and the geographic proximity network between the premises of this state, in addition to hypothetical networks following the network models Molloy-Reed, Kalisky, Method A and Method B, where we simulated, using different configurations of the model SLIRS, the spread of diseases with hypothetical parameters e real ones (brucellosis and foot and mouth disease). Moreover, we simulated the control of these diseases spreading, considering the control by immunization and by restriction, with and without the rearrangement of the movements after the restriction, selecting the premises to be protected randomly, based on the degree of animal's movements and using the concept of the friendship paradox. Among the results, stands out that although the pattern of the prevalence curves in the hypothetical networks were similar to the ones in the real network, the observed values were higher in the hypothetical networks, indicating that using them in the planning of policies to control diseases in place of the real network might lead to a greater expense of resources than it would be necessary. Furthermore, in the control of the diseases both with hypothetical parameters as well as with real parameters, in the simulations using only the animal's movements network, it was observed a more effective reduction of the prevalence when selecting the premises with the highest total degree than the random selection, while in the simulations that considered the network of geographic proximity of the premises, the reduction in the prevalence of the strategies that selected specific premises were similar to the random selection. On the effect of rearranging the movements, it was observed that it may facilitate the spread of diseases in the network even in situations where some control strategy is used. We hope that the results of the mathematical simulations may contribute to the discussion of the relative impact of the mentioned control strategies and that in the future they

may assist in the activities of agencies responsible for disease surveillance and in the development of policies to prevent and control diseases in animals.

Keywords: Complex networks. Animal movements. Cattle. Epidemic modeling. Disease spreading.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	MODELAGEM DO ESPALHAMENTO DE DOENÇAS EM REDES	19
1.2	REDES	20
1.3	GERAÇÃO DE REDES HIPOTÉTICAS	22
1.4	CONTROLE DO ESPALHAMENTO DE DOENÇAS APLICANDO O PARADOXO DA AMIZADE	22
1.5	ANÁLISE DE RISCO.....	23
2	OBJETIVOS	25
2.1	OBJETIVO GERAL.....	25
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1	REDES DO ESTADO DE MATO GROSSO	27
3.2	MODELOS DAS REDES HIPOTÉTICAS	28
3.2.1	Modelo Molloy-Reed	29
3.2.2	Modelo Kalisky	30
3.2.3	Modelo Método A	31
3.2.4	Modelo Método B	32
3.3	MODELO DAS SIMULAÇÕES DA DINÂMICA DE ESPALHAMENTO.....	33
3.4	TIPOS DE CONTROLE	34
3.5	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE	34
3.6	PARÂMETROS DAS DOENÇAS SIMULADAS.....	35
3.7	SIMULAÇÃO DO ESPALHAMENTO DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS NA REDE MT1 E NAS REDES HIPOTÉTICAS	37
3.8	SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS	38
3.8.1	Espalhamento apenas pela rede MT2.....	38
3.8.2	Espalhamento pela rede MT2 e pelas redes de proximidade	38
3.8.3	Espalhamento apenas pelas redes de proximidade	39
3.8.3.1	Usando os graus da rede MT2	39
3.8.3.2	Usando os graus das redes de proximidade.....	40
3.9	SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS REAIS ..	40

3.9.1	Brucelose com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica.....	40
3.9.2	Febre aftosa com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica, e as redes de proximidade.....	41
3.9.2.1	Febre aftosa com espalhamento apenas pela rede MT2 estática e dinâmica	41
3.9.2.2	Febre aftosa com espalhamento apenas pelas redes de proximidade	41
3.10	ALGORITMO E PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES.....	42
3.11	ANÁLISE DE RISCO	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	ESPALHAMENTO DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS NA REDE MT1 E NAS REDES HIPOTÉTICAS	45
4.2	CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS	47
4.2.1	Espalhamento apenas pela rede MT2	47
4.2.1.1	Imunização e restrição sem rearranjo	48
4.2.1.2	Restrição com rearranjo	50
4.2.2	Espalhamento pela rede MT2 e pelas redes de proximidade.....	51
4.2.3	Espalhamento apenas pelas redes de proximidade.....	54
4.2.3.1	Usando os graus da rede MT2	54
4.2.3.2	Usando os graus das redes de proximidade	55
4.3	CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS REAIS	58
4.3.1	Brucelose com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica.....	58
4.3.2	Febre aftosa com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica e pelas redes de proximidade.....	65
4.3.2.1	Febre aftosa com espalhamento apenas pela rede MT2 estática e dinâmica	80
4.3.2.2	Febre aftosa com espalhamento apenas pelas redes de proximidade	87
5	CONCLUSÕES.....	93
5.1	ESPALHAMENTO DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS NA REDE MT1 E NAS REDES HIPOTÉTICAS	93
5.2	CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS	93
5.2.1	Espalhamento apenas pela rede MT2	94
5.2.1.1	Imunização e restrição sem rearranjo	94
5.2.1.2	Restrição com rearranjo	94
5.2.2	Espalhamento pela rede MT2 e pelas redes de proximidade.....	95
5.2.3	Espalhamento apenas pelas redes de proximidade.....	95
5.2.3.1	Usando os graus da rede MT2	95

5.2.3.2	Usando os graus das redes de proximidade.....	96
5.3	CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS REAIS	96
5.3.1	Brucelose com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica	96
5.3.2	Febre aftosa com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica, e pelas redes de proximidade	97
5.3.3.1	Febre aftosa com espalhamento apenas pela rede MT2 estática e dinâmica.....	97
5.3.3.2	Febre aftosa com espalhamento apenas pelas redes de proximidade.....	97
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção, apresentam-se alguns conceitos básicos para o melhor entendimento deste trabalho.

1.1 MODELAGEM DO ESPALHAMENTO DE DOENÇAS EM REDES

Modelos epidemiológicos são uma simplificação do complexo sistema envolvido no espalhamento de doenças numa população, mas apesar de serem mais simples, ainda reproduzem o comportamento do sistema em estudo.

Existem diversos tipos de modelos epidemiológicos, sendo que os mais utilizados são os modelos epidemiológicos baseados em equações diferenciais, que geralmente, assumem que cada indivíduo tem a mesma chance de entrar em contato com qualquer outro indivíduo da população (homogeneidade). Todavia, tal suposição muitas vezes não é realista, pois, sabe-se que um indivíduo tem mais chances de se encontrar com outros que participem de seu grupo social (heterogeneidade).

Assim, a fim de agregar a informação da heterogeneidade das relações dos indivíduos, desenvolveram-se modelos que incorporam a rede de contatos dos indivíduos, gerando assim modelos mais realistas (LINDQUIST et al., 2011), os quais vem sendo usados em estudos sobre o espalhamento de doenças (LLOYD; MAY, 2001; MAY; LLOYD, 2001; PASTOR-SATORRAS; VESPIGNANI, 2001; WOOLHOUSE et al., 2005; MEYERS, 2007; OSSADA et al., 2013).

Em Veterinária, é comum utilizar as redes de movimentação animal, as quais, apresentam um alto grau de heterogeneidade (BIGRAS-POULIN et al., 2006; BIGRAS-POULIN et al., 2007; NATALE et al., 2009), o que pode influenciar o potencial risco de transmissão de uma doença, como por exemplo, no espalhamento de doenças crônicas, como a brucelose bovina e de doenças agudas, como a febre aftosa. Assim, simular o espalhamento de doenças nas redes de movimentação pode indicar caminhos para a otimizar a prevenção e o controle de doenças que possam vir a afetar os animais.

1.2 REDES

Redes podem representar uma série de sistemas biológicos, sociais e tecnológicos (PASTOR-SATORRAS; VESPIGNANI, 2001), sendo o objeto de estudo deste trabalho as redes de movimentação de animais. Redes são compostas por **vértices**, que no caso deste trabalho representam estabelecimentos que comercializaram animais (fazendas, feiras, etc) e **arestas**, que representam o comércio de animais entre os estabelecimentos. As arestas podem ser **direcionadas**, representando, por exemplo, que um lote de animais foi vendido do estabelecimento A para o estabelecimento B (caracterizando assim uma **rede direcionada**); ou **não-direcionadas**, representando, por exemplo, que um estabelecimento C encontra-se próximo geograficamente de um estabelecimento D e vice-versa (caracterizando uma **rede não-direcionada**). Em algumas redes, tem-se também, a presença de **arestas múltiplas**, que é quando existe mais de uma aresta entre o mesmo par de vértices, e **laços**, ou seja, quando uma aresta conecta um vértice a si mesmo (Figura 1.1.1). E, a **topologia** da rede se caracteriza pela estrutura formada pelo modo como os vértices e as arestas se conectam.

Figura 1.1.1 – À esquerda, uma rede cujas arestas são não direcionadas e à direita, a mesma rede, mas cujas arestas são direcionadas

Fonte: (OSSADA, R., 2011).

Define-se que o **grau** (k) de um vértice é o número de arestas que este possui. Sendo que no caso de uma rede direcionada, define-se, também, o **grau de entrada** (k_{in}) de um vértice, como o número de arestas que apontam para este vértice; e o **grau de saída** (k_{out}) de

um vértice, como o número de arestas que saem deste vértice (WASSERMAN; FAUST, 1994).

Em algumas redes reais (AMARAL et al., 2000; CLAUSET et al., 2009; NEWMAN, 2010), a probabilidade de um vértice ter k arestas segue uma distribuição de graus conhecida como **lei de potência**: $P(k) \sim k^{-\alpha}$, onde α é o expoente cujo valor, para estas redes, geralmente varia de 2 até 3 (BARABASI; ALBERT, 1999; PASTOR-SATORRAS; VESPIGNANI, 2001; JEONG, 2003); caracterizando assim uma **rede livre de escala** (Figura 1.1.2). Assim, a análise do $P(k)$ em função de k , pode indicar se uma rede pertence a uma categoria de redes com características conhecidas.

Figura 1.1.2 – À esquerda, ilustração de uma rede livre de escala e à direita, sua distribuição de graus

Fonte: (OSSADA, R., 2011).

Além do que já foi apresentado, quando se estuda redes considerando um período de tempo, podemos considerá-la como sendo **estática**, ou seja, que as arestas entre os vértices são permanentes ao longo de todo o período estudado, ou considerá-la como sendo **dinâmica**, ou seja, as arestas entre os vértices podem se alterar ao longo do período estudado (VERNON; KEELING, 2009).

1.3 GERAÇÃO DE REDES HIPOTÉTICAS

Em muitas situações não se tem conhecimento sobre toda a topologia de uma rede. Todavia, nestes casos, a fim de tentar reconstruir a rede original, e/ou reproduzir processos que possam vir a ocorrer nesta ou sobre ela, pode-se utilizar alguns **modelos de rede**, utilizando como informação inicial a quantidade de vértices e a distribuição de graus da rede original, os quais, por exemplo, podem ser obtidos através da aplicação de um questionário, criando assim **redes hipotéticas** baseadas em informações da rede original.

Neste trabalho, utilizaram-se 4 modelos de rede hipotéticas, desenvolvidos por Molloy-Reed, Kalisky (KALISKY; COHEN; HAVLIN, 2004) e Grisi-Filho (GRISI-FILHO et al., 2013), a fim de verificar se os resultados observados na rede do Estado de Mato Grosso seriam observados em alguma destas redes hipotéticas, tornando-a assim uma possível opção para situações em que não se dispusesse de informações sobre a topologia da rede do Estado de Mato Grosso.

1.4 CONTROLE DO ESPALHAMENTO DE DOENÇAS APLICANDO O PARADOXO DA AMIZADE

Quando se pensa no controle do espalhamento de alguma doença, o ideal seria proteger toda a população, contudo, sabe-se que isso muitas vezes não é possível. Assim, outra abordagem que poderia ser adotada, seria a de proteger as pessoas mais propensas a espalharem a doença, ou seja, as pessoas que tenham muitos amigos.

Em um estudo sobre as características das redes sociais, Feld (1991) calculou a média de amigos que uma pessoa tinha na rede e a comparou com as médias de amigos que os amigos dessa pessoa tinham. Descobrindo que o segundo valor quase sempre era maior que o primeiro, chegando à conclusão que, em média, os nossos amigos têm mais amigos que nós, que é a ideia básica do paradoxo da amizade.

Utilizando as ideias anteriores, Christakis e Fowler (2010) realizaram um estudo sobre o espalhamento de influenza onde, num primeiro momento selecionaram aleatoriamente algumas pessoas ao acaso e então pediram que essas pessoas indicassem alguns amigos os quais então foram monitorados, descobrindo que os amigos das pessoas selecionadas no

primeiro momento contraem a doença mais cedo. Indicando assim, que seria mais eficaz proteger os amigos das pessoas selecionadas no primeiro momento, do que as pessoas selecionadas no primeiro momento.

De acordo com Amaku (2013), o paradoxo da amizade pode ser aplicado no controle de doenças que se espalham entre estabelecimentos devido ao comércio de animais, mesmo quando não se tem a informação total sobre a rede de movimentação de animais. Na prática, essa estratégia consistiria em sortear aleatoriamente um conjunto de estabelecimentos e então seria aplicado um questionário a fim de descobrir quais seriam os principais parceiros comerciais do estabelecimento sorteado, e então aplicar-se-ia uma medida de controle no parceiro comercial.

1.5 ANÁLISE DE RISCO

A análise de risco, visa usar de forma sistemática a informação disponível para determinar a frequência de ocorrência de um determinado evento e suas consequências (risco), para assim entender sua complexidade e facilitar o desenvolvimento e a adoção de medidas que visem controlá-lo.

Realizando simulações com modelos epidemiológicos, além de estudar o espalhamento e o efeito do controle de doenças infecciosas, é possível avaliar a frequência com que um estabelecimento adquire uma infecção e a quantidade de tempo que o estabelecimento fica infectado, além das consequências deste evento na prevalência da doença na região estudada.

2 OBJETIVOS

A seguir, apresentam-se os objetivos deste trabalho.

2.1 OBJETIVO GERAL

Modelar e comparar o efeito de estratégias de controle via imunização e restrição da movimentação em redes de trânsito de animais, com enfoque para a rede de movimentação de bovinos do Estado de Mato Grosso de 2007, Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Gerar redes hipotéticas a partir da distribuição de graus da rede do Estado de Mato Grosso.
 - 1.1) Simular o espalhamento de doenças infecciosas nas redes hipotéticas a fim de verificar se em alguma das redes hipotéticas as doenças apresentariam os mesmos resultados que na rede de Mato Grosso.
- 2) Simular o efeito de estratégias de imunização e restrição de movimentação:
 - 2.1) simulando o espalhamento apenas pela rede de movimentação de animais.
 - 2.2) simulando o espalhamento pela rede de movimentação de animais e de proximidade geográfica.
 - 2.3) simulando o espalhamento apenas pela rede de proximidade geográfica.
- 3) Comparar os resultados das simulações das estratégias de imunização e restrição de movimentação.
- 4) Simular o espalhamento e o controle de doenças considerando parâmetros estimados para uma doença real crônica (brucelose) e outra aguda (febre aftosa).
- 5) Realizar um estudo de análise de risco baseado nos resultados das simulações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, descrevem-se as informações usadas neste trabalho e como estas foram utilizadas.

3.1 REDES DO ESTADO DE MATO GROSSO

Para construir a rede real, utilizamos as informações relativas as movimentações de bovinos que ocorreram durante o ano de 2007, constantes no banco de dados de Guias de Trânsito Animal (GTA) do Estado de Mato Grosso (MT), Brasil, cedidos pelo Instituto de Defesa do Estado de Mato Grosso – INDEA/MT (MATO GROSSO, 2008). As informações consideradas relevantes para este trabalho foram o código único e as coordenadas geográficas de cada estabelecimento, além da origem, o destino, a data e a finalidade de cada movimentação. Algumas inconsistências, como fazendas recebendo animais com a finalidade de abate e abatedouros enviando animais, foram removidas. Consideraram-se apenas as movimentações cuja origem ou destino ocorreu no Estado de Mato Grosso.

Para a reconstrução da rede de Mato Grosso, foram retiradas as movimentações com finalidade de abate, pois estas não contribuem no espalhamento de uma doença (NATALE et al., 2009). Além disso, desconsideraram-se os laços e agruparam-se as arestas múltiplas entre dois vértices em uma única aresta. Construindo assim as seguintes redes:

- 1) **Rede MT1:** Composta por 86.541 vértices e 167.421 arestas direcionadas.
- 2) **Rede MT2:** Composta por 79.551 vértices e 156.284 arestas direcionadas. A diferença no número de vértices e arestas em relação à Rede MT1 se dá pela retirada dos estabelecimentos cujas coordenadas geográficas não foram consideradas consistentes.
- 3) **Rede de Proximidade 5km:** Composta por 79.551 vértices e 1.112.822 arestas não-direcionadas. Nesta rede, assim como na Rede MT2, consideram-se apenas os vértices cujas coordenadas geográficas foram consistentes e considera-se que há uma aresta entre dois vértices quando há uma distância euclidiana geográfica de até 5km entre os vértices.
- 4) **Rede de Proximidade 10km:** Composta por 79.551 vértices e 3.617.381 arestas não-direcionadas. Esta rede assemelha-se à Rede de Proximidade 5km, exceto que a distância considerada é de até 10km.

É importante destacar que as distâncias usadas para definir as redes de proximidade geográfica se aproximam das distâncias utilizadas para definir zonas sanitárias no caso confirmado de febre aftosa (PANAFTOSA, 2007): zona focal e zona perifocal (de 5 a 10km a partir do foco).

3.2 MODELOS DAS REDES HIPOTÉTICAS

A seguir, são apresentadas, de forma simplificada, as sequências de passos dos algoritmos usados para gerar as redes hipotéticas, tendo como base, a quantidade de vértices e a distribuição de graus da Rede MT1. Além disso, apresentam-se referências onde os algoritmos são descritos com mais detalhes e figuras exemplificativas da topologia dessas redes hipotéticas (Figuras 3.2.1.1, 3.2.2.1, 3.2.3.1 e 3.2.4.1).

Os modelos de redes usados nesse estudo foram: o **modelo Molloy-Reed** (KALISKY; COHEN; HAVLIN, 2004), o **modelo Kalisky** (KALISKY; COHEN; HAVLIN, 2004), o **modelo Método A** (GRISI-FILHO et al., 2013) e o **modelo Método B** (GRISI-FILHO et al., 2013). Sendo que os algoritmos destes modelos foram implementados no programa R, usando os pacotes igraph, Matrix e nnet (VENABLES; RIPLEY, 2002; CSARDI; NEPUSZ, 2006; R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2010; BATES; MAECHLER, 2011). Foram geradas 10 redes de cada modelo mencionado anteriormente, sendo todas elas direcionadas, as arestas múltiplas foram agrupadas em uma única aresta e os laços foram descartados.

Estas redes foram usadas para verificar se alguma produziria resultados semelhantes aos da Rede MT1 nas simulações da dinâmica de espalhamento de uma doença, podendo assim serem usadas em situações em que a informação sobre a topologia da rede de Mato Grosso não exista ou esteja incompleta.

3.2.1 Modelo Molloy-Reed

- 1) Tem-se um vetor com os graus de entrada de cada vértice da rede do Mato Grosso;
- 2) Tem-se um vetor com os graus de saída de cada vértice da rede do Mato Grosso;
- 3) Enquanto existirem vértices com arestas de saída livres:
 - 3.1) Escolhe-se aleatoriamente um vértice A, sendo a probabilidade de selecioná-lo, diretamente proporcional ao seu grau de saída remanescente;
 - 3.2) Escolhe-se aleatoriamente um vértice B, sendo a probabilidade de selecioná-lo, diretamente proporcional ao seu grau de entrada remanescente e conecta-o ao vértice A.

Figura 3.2.1.1 – Ilustração de uma rede que segue o modelo Molloy-Reed

Fonte: (OSSADA, R., 2011).

3.2.2 Modelo Kalisky

- 1) Tem-se um vetor com os graus de entrada de cada vértice da rede do Mato Grosso.
- 2) Tem-se um vetor com os graus de saída de cada vértice da rede do Mato Grosso.
- 3) Enquanto existirem vértices com arestas de saída livres:
 - 3.1) Seleciona-se o vértice com o maior grau de saída (K_{out1});
 - 3.2) Escolhe-se aleatoriamente K_{out1} vértices, sendo a probabilidade de selecioná-los, diretamente proporcional aos seus graus de entrada remanescentes, conectando-os com o vértice do passo (3.1). Formando a 1ª camada;
 - 3.3) Enquanto existirem vértices com arestas livres em cada camada:
 - 3.3.1) Seleciona-se o vértice com maior grau de saída desta camada (K_{out2});
 - 3.3.2) Escolhe-se aleatoriamente K_{out2} vértices, sendo a probabilidade de selecioná-los, diretamente proporcional aos seus graus de entrada remanescentes, conectando-os com o vértice do passo (3.3.1);
 - 3.3.3) Os vértices escolhidos no passo 3.3.2 fazem parte da próxima camada.

Figura 3.2.2.1 – Ilustração de uma rede que segue o modelo Kalisky

3.2.3 Modelo Método A

- 1) Tem-se um vetor com os graus de entrada de cada vértice da rede do Mato Grosso.
- 2) Tem-se um vetor com os graus de saída de cada vértice da rede do Mato Grosso.
- 3) Enquanto existirem vértices com arestas de saída livres:
 - 3.1) Seleciona-se o vértice com o maior grau de saída (K_{out});
 - 3.2) Escolhe-se aleatoriamente K_{out} vértices conectando-os com o vértice do passo (3.1).

Figura 3.2.3.1 – Ilustração de uma rede que segue o modelo Método A

Fonte: (OSSADA, R., 2011).

3.2.4 Modelo Método B

- 1) Tem-se um vetor com os graus de entrada de cada vértice da rede do Mato Grosso.
- 2) Tem-se um vetor com os graus de saída de cada vértice da rede do Mato Grosso.
- 3) Enquanto existirem vértices com arestas de saída livres:
 - 3.1) Seleciona-se o vértice com o maior grau de saída (K_{out});
 - 3.2) Conecta-se o vértice do passo (3.1) com os primeiros K_{out} vértices que tem arestas de entrada livres.

Figura 3.2.4.1 – Ilustração de uma rede que segue o modelo Método B

Fonte: (OSSADA, R., 2011).

3.3 MODELO DAS SIMULAÇÕES DA DINÂMICA DE ESPALHAMENTO

A seguir, apresenta-se um esquema do modelo da dinâmica de espalhamento de uma doença usado nas simulações em conjunto com as redes deste trabalho (Figura 3.3.1):

Figura 3.3.1 – Esquema do Modelo SIRS (Suscetível – Latente – Infectado – Recuperado – Suscetível)

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Onde, **S** representa um estabelecimento que está suscetível a adquirir a doença;

L representa um estabelecimento que possui animais no estado latente da doença;

I representa um estabelecimento que está infectado, isto é, pode transmitir a doença caso venda animais para um estabelecimento suscetível;

R representa um estabelecimento que está protegido da doença, representando, por exemplo, o efeito de uma estratégia de imunização ou de restrição de um estabelecimento;

p é a probabilidade de que um estabelecimento suscetível, que comercialize com um estabelecimento infectado, adquira a doença;

ω é a quantidade de unidades de tempo numa simulação, que um estabelecimento permanecerá no estado latente;

γ é a quantidade de unidades de tempo numa simulação, que um estabelecimento permanecerá infectado;

δ é a quantidade de unidades de tempo numa simulação, que um estabelecimento permanecerá protegido da doença.

3.4 TIPOS DE CONTROLE

A seguir, apresentam-se as definições dos tipos de controle adotados neste trabalho:

- 1) **Imunização:** Supõe-se que o estabelecimento imuniza seus animais e faz um controle rígido dos animais comercializados, assim ele não comprará e nem venderá animais infectados (ou seja, supõe-se que os testes diagnósticos sejam perfeitos); e seus animais não podem adquirir uma doença mesmo que o estabelecimento esteja próximo geograficamente a algum estabelecimento com animais infectados.
- 2) **Restrição sem rearranjo:** Supõe-se que o estabelecimento pode possuir tanto animais suscetíveis quanto infectados, porém suas movimentações foram restritas, assim, não será infectado ou infectará outro estabelecimento devido ao comércio de animais, porém, ainda pode contribuir para o espalhamento de uma doença caso esteja próximo geograficamente a outro estabelecimento. Além disso, neste caso, supõe-se que os estabelecimentos que comercializavam com o estabelecimento restrito não buscam por novos compradores e/ou fornecedores.
- 3) **Restrição com rearranjo:** mesmo que a Restrição sem rearranjo, exceto que, supõe-se que os estabelecimentos que comercializavam com o estabelecimento restrito, buscam, aleatoriamente, por novos compradores e/ou fornecedores.

3.5 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

A seguir, apresenta-se a descrição das estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos, usadas neste trabalho:

- 1) **Uniform:** selecionam-se aleatoriamente os estabelecimentos (cada estabelecimento tem a mesma probabilidade de ser selecionado, distribuição uniforme).
- 2) **Kin:** selecionam-se os estabelecimentos com maior grau de entrada (movimentações de compra).
- 3) **Kout:** selecionam-se os estabelecimentos com maior grau de saída (movimentações de venda).

4) **Ktotal**: selecionam-se os estabelecimentos com maior grau total (soma das movimentações de compra e venda).

5) **ParadoxRandom1**: Num primeiro momento sorteiam-se aleatoriamente alguns estabelecimentos, e seleciona-se aleatoriamente 1 estabelecimento que tenha vendido animais para o estabelecimento sorteado no momento anterior, caso nenhum estabelecimento tenha vendido animais para o estabelecimento sorteado, não se seleciona nenhum estabelecimento (Estratégia baseada no Paradoxo da Amizade).

6) **ParadoxRandom3**: Semelhante à estratégia ParadoxRandom1, num primeiro momento sorteiam-se aleatoriamente alguns estabelecimentos, porém, agora, selecionam-se aleatoriamente 3 estabelecimentos que tenham vendido animais para o estabelecimento sorteado no momento anterior. Caso o número de estabelecimentos que tenham vendido animais seja menor que 3 selecionam-se todos eles e caso nenhum estabelecimento tenha vendido animais para o estabelecimento sorteado, não se seleciona nenhum estabelecimento. Nesta estratégia, é possível que o número total de estabelecimentos selecionados após o segundo momento, seja maior que o número que se deseja selecionar; neste caso, escolhem-se os estabelecimentos que mais vezes foram indicados no segundo momento, sendo que em caso de empate no número de indicações, escolhe-se aleatoriamente os estabelecimentos, até atingir o número de estabelecimentos desejado (Estratégia baseada no Paradoxo da Amizade).

3.6 PARÂMETROS DAS DOENÇAS SIMULADAS

Nesta seção, apresentam-se os parâmetros das doenças usadas nas simulações deste trabalho, salientando que os parâmetros das doenças hipotéticas foram escolhidos arbitrariamente.

1) **Doença aguda com parâmetros hipotéticos**: A quantidade de unidades de tempo que um estabelecimento permanecerá infectado (γ_i) será sorteada de uma distribuição Binomial, onde $\gamma_i \sim \text{Binomial}(nI=180, pI \approx 0.167)$, a qual foi aproximada de uma distribuição Normal, com média igual à 30 dias e variância igual à 25 dias². Os cálculos para se fazer essa aproximação são apresentados a seguir:

Sabe-se que é possível aproximar uma distribuição Binomial (média= $n \cdot p$ e variância= $n \cdot p \cdot (1-p)$), por uma distribuição Normal (média= μ e variância= σ^2), assim temos:

$$\mu = n \cdot p \text{ e } \sigma^2 = n \cdot p \cdot (1-p), \text{ onde } 0 \leq p \leq 1. \quad (\text{Relação 1})$$

Assim, utilizando a Relação 1, podemos calcular os parâmetros para a doença aguda:

$$\begin{array}{l} 30 = n \cdot p \\ 25 = n \cdot p \cdot (1-p) \end{array} \Rightarrow \left| \begin{array}{l} 25 = 30 \cdot (1-p) \Rightarrow \frac{25}{30} - 1 = -p \Rightarrow p \approx 0.167 \\ \therefore 30 \approx n \cdot 0.167 \Rightarrow n \approx \frac{30}{0.167} \Rightarrow n \approx 180 \end{array} \right.$$

2) **Doença crônica com parâmetros hipotéticos:** A quantidade de unidades de tempo que um estabelecimento permanecerá infectado (γ_i) será sorteada de uma distribuição Binomial, onde $\gamma_i \sim \text{Binomial}(nI=498, pI \approx 0.722)$, a qual foi aproximada de uma distribuição Normal, com média igual à 360 dias e variância igual à 100 dias². Os cálculos para se fazer essa aproximação são apresentados a seguir, utilizando a Relação 1:

$$\begin{array}{l} 360 = n \cdot p \\ 100 = n \cdot p \cdot (1-p) \end{array} \Rightarrow \left| \begin{array}{l} 100 = 360 \cdot (1-p) \Rightarrow \frac{100}{360} - 1 = -p \Rightarrow p \approx 0.722 \\ \therefore 360 \approx n \cdot 0.722 \Rightarrow n \approx \frac{360}{0.722} \Rightarrow n \approx 498 \end{array} \right.$$

3) **Proteção curta com parâmetros hipotéticos:** A quantidade de unidades de tempo que um estabelecimento permanecerá no estado recuperado (δ_i) será sorteada de uma distribuição Binomial, onde $\delta_i \sim \text{Binomial}(nR=406, pI \approx 0.444)$, a qual foi aproximada de uma distribuição Normal, com média igual à 180 dias e variância igual à 100 dias². Os cálculos para se fazer essa aproximação são apresentados a seguir, utilizando a Relação 1:

$$\begin{array}{l} 180 = n \cdot p \\ 100 = n \cdot p \cdot (1-p) \end{array} \Rightarrow \left| \begin{array}{l} 100 = 180 \cdot (1-p) \Rightarrow \frac{100}{180} - 1 = -p \Rightarrow p \approx 0.444 \\ \therefore 180 \approx n \cdot 0.444 \Rightarrow n \approx \frac{180}{0.444} \Rightarrow n \approx 406 \end{array} \right.$$

4) **Proteção longa com parâmetros hipotéticos:** A quantidade de unidades de tempo que um estabelecimento permanecerá no estado recuperado (δ_i) será sorteada de uma distribuição

Binomial, onde $\delta_i \sim \text{Binomial}(nR=498, pI \approx 0.722)$, a qual foi aproximada de uma distribuição Normal, com média igual à 360 dias e variância igual à 100 dias². Os cálculos para se fazer essa aproximação são os mesmos apresentados para a doença crônica com parâmetros hipotéticos.

5) **Brucelose:** A quantidade de unidades de tempo que um estabelecimento permanecerá no estado latente (ω_i) será sorteada de uma distribuição Uniforme, onde $\omega_i \sim \text{Uniforme}(\text{mínimo}=1 \text{ dia}, \text{máximo}=463) \text{ dias}$, sendo que o valor máximo foi baseado no valor médio do intervalo entre partos encontrado num estudo desenvolvido por Corrêa et al. (2000), já que a infecção, em geral, se dá devido aos produtos de um aborto ou pelo parto de um animal infectado. E após o período latente, considerou-se que o estabelecimento fica infectado até o fim do período simulado.

6) **Febre Aftosa:** A quantidade de unidades de tempo que um estabelecimento permanecerá infectado (γ_i) será sorteada de uma distribuição Uniforme, onde $\gamma_i \sim \text{Uniforme}(\text{mínimo}=5 \text{ dias}, \text{máximo}=40 \text{ dias})$, esses valores foram baseados nos valores encontrados num estudo desenvolvido por Keeling et al. (2010).

3.7 SIMULAÇÃO DO ESPALHAMENTO DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS NA REDE MT1 E NAS REDES HIPOTÉTICAS

Nestas simulações foram usadas a rede MT1 e as redes hipotéticas geradas a partir da quantidade de vértices e da distribuição de graus da rede MT1 (Rede Molloy-Reed, rede Kalisky, rede Método A e rede Método B).

O modelo de espalhamento de doenças utilizado foi o SIRS (Suscetível – Infectado – Recuperado – Suscetível), simulando assim 4 doenças com parâmetros hipotéticos: doença aguda com proteção curta; doença aguda com proteção longa; doença crônica com proteção curta e doença crônica com proteção longa.

Os objetivos dessa simulação foram: avaliar o comportamento do modelo de espalhamento SIRS nas diferentes redes e verificar se em alguma das redes hipotéticas as doenças simuladas apresentariam os mesmos resultados que na rede MT1.

3.8 SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS

Nesta seção, apresentam-se a descrição das simulações do controle de doenças com parâmetros hipotéticos que se espalham apenas pela rede MT2, pela rede MT2 e pelas redes de proximidade e apenas pelas redes de proximidade.

3.8.1 Espalhamento apenas pela rede MT2

Nestas simulações foi usada apenas a rede MT2. O modelo de espalhamento de doenças utilizado foi o SIS (Suscetível – Infectado – Suscetível), pois assim poder-se-ia verificar os efeitos dos tipos e estratégias de controle propostos e evitar possíveis efeitos devido às características oriundas das doenças, como um possível desaparecimento das doenças agudas caso utilizado o compartimento de recuperados. Assim, simularam-se doenças aguda e crônica com parâmetros hipotéticos, usando os controles por imunização, restrição sem rearranjo e restrição com rearranjo, aplicando todas as estratégias de seleção apresentadas na Seção 3.5.

O objetivo dessas simulações foi verificar os efeitos dos diferentes tipos e estratégias de controle propostos numa situação em que as doenças se espalhassem apenas pela rede de movimentação de animais.

3.8.2 Espalhamento pela rede MT2 e pelas redes de proximidade

Nestas simulações foram usadas a rede MT2 em conjunto, ora com a rede de proximidade 5km, ora com a rede de proximidade 10km. O modelo de espalhamento de doenças utilizado foi o SIS (Suscetível – Infectado – Suscetível), simulando doenças aguda e crônica com parâmetros hipotéticos, que podiam se espalhar tanto pela rede de movimentações quanto pela rede de proximidade; usando os controles por imunização e restrição sem rearranjo aplicando todas as estratégias de seleção apresentadas na Seção 3.5.

O objetivo dessas simulações foi verificar os efeitos dos diferentes tipos e estratégias de controle propostos numa situação em que as doenças pudessem se espalhar tanto pela rede de movimentação de animais quanto pela rede de proximidade dos estabelecimentos (exemplos: devido ao deslocamento de pessoas, veículos, equipamentos, etc.).

3.8.3 Espalhamento apenas pelas redes de proximidade

Nesta seção, como a informação usada na escolha dos vértices a serem protegidos foi diferente, apresentam-se a descrição dessas simulações separadamente.

3.8.3.1 Usando os graus da rede MT2

Nestas simulações foram usadas as redes de proximidade 5km e 10km, separadamente. O modelo de espalhamento de doenças utilizado foi o SIS (Suscetível – Infectado – Suscetível). Assim, simularam-se doenças aguda e crônica com parâmetros hipotéticos, usando apenas o controle por imunização, já que este é o único que se aplica às redes de proximidade (pois supôs-se que a restrição sem rearranjo não teria efeito nas redes de proximidade), aplicando todas as estratégias de seleção apresentadas na Seção 3.5, usando os graus de movimentação de animais da rede MT2, para selecionar os vértices a serem protegidos.

O objetivo dessas simulações foi verificar os efeitos dos diferentes tipos e estratégias de controle propostos, usando o grau de movimentação da rede MT2, numa situação em que as doenças se espalhassem apenas pela rede de proximidade dos estabelecimentos (exemplos: devido ao deslocamento de pessoas, veículos, equipamentos, etc.).

3.8.3.2 Usando os graus das redes de proximidade

Estas simulações foram semelhantes às simulações realizadas na Seção 3.8.3.1, exceto que nestas simulações as estratégias de seleção apresentadas na Seção 3.5 foram modificadas a fim de usar os graus das redes de proximidade (5km e 10km) ao invés dos da rede MT2, para selecionar os vértices a serem protegidos.

O objetivo dessas simulações foi verificar, ao se utilizar os graus das redes de proximidade, os efeitos dos diferentes tipos e estratégias de controle propostos numa situação em que as doenças se espalhassem apenas pela rede de proximidade dos estabelecimentos (exemplos: devido ao deslocamento de pessoas, veículos, equipamentos, etc.).

3.9 SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS REAIS

Nesta seção, apresentam-se a descrição das simulações do controle de doenças usando os parâmetros da brucelose (doença crônica) e da febre aftosa (doença aguda).

3.9.1 Brucelose com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica

A brucelose é uma doença crônica e sua transmissão se dá pelo contato direto de um animal infectado com um animal suscetível. Assim, nestas simulações foi usada apenas a rede MT2 estática e dinâmica. O modelo de espalhamento de doenças utilizado foi o SLI (Suscetível – Latente – Infectado). Foram usados os controles por imunização e restrição sem rearranjo aplicando todas as estratégias de controle apresentadas na Seção 3.5. O objetivo dessas simulações foi verificar os efeitos dos diferentes tipos e estratégias de controle propostos no caso do espalhamento da brucelose nas diferentes versões da rede MT2.

3.9.2 Febre aftosa com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica, e as redes de proximidade

A febre aftosa é uma doença aguda e sua transmissão pode ocorrer tanto pelo contato direto de um animal infectado com um animal suscetível quanto pelo contato indireto (proximidade geográfica, ambiente, ar, água, etc). Assim, nestas simulações foram usadas a rede MT2 estática e dinâmica, em conjunto ora com a rede de proximidade 5km e ora com a rede de proximidade 10km. O modelo de espalhamento de doenças utilizado foi o SIS (Suscetível – Infectado – Suscetível). Foram usados os controles por imunização e restrição sem rearranjo aplicando todas as estratégias de seleção apresentadas na Seção 3.5. O objetivo dessas simulações foi verificar os efeitos dos diferentes tipos e estratégias de controle propostos no caso do espalhamento da febre aftosa.

3.9.2.1 Febre aftosa com espalhamento apenas pela rede MT2 estática e dinâmica

Essas simulações foram realizadas com o objetivo de verificar o espalhamento da febre aftosa, considerando apenas a rede MT2 estática e dinâmica nos diferentes cenários propostos.

3.9.2.2 Febre aftosa com espalhamento apenas pelas redes de proximidade

Essas simulações foram realizadas com o objetivo de verificar o espalhamento da febre aftosa, considerando apenas as redes de proximidade e o controle por imunização, já que a restrição sem rearranjo não se aplica a essas redes, nos diferentes cenários propostos.

3.10 ALGORITMO E PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES

A seguir, apresenta-se o algoritmo geral, que foi implementado no programa MATLAB, usado nas simulações de espalhamento e controle de doenças, sendo que este algoritmo foi adaptado conforme o cenário simulado. Em todas as simulações, variou-se a proporção inicial de infectados (π_0) utilizando os valores 20%, 50% e 80%; A probabilidade de espalhamento das doenças em uma movimentação de comércio (λ_1) utilizando os valores 5%, 10%, 40%, 70% e 100%; A probabilidade de espalhamento das doenças devido à proximidade (λ_2) utilizando os valores 1% e 5%; A proporção inicial a qual se aplicou alguma estratégia de controle (ψ_0) utilizando os valores 5%, 10% e 20% e o tempo total utilizado foi de 1825 dias, sendo que a dinâmica das movimentações da rede dinâmica se repetiria em ciclos de 365 dias até o final das simulações.

1) Inicialmente, uma proporção ($\pi_0 = 20\%, 50\% \text{ e } 80\%$) dos vértices é infectada aleatoriamente;

1.1) Nas simulações com as redes hipotéticas, inicialmente uma proporção arbitrária ($\varepsilon_0 = 20\%$) dos vértices é colocada no estado recuperado aleatoriamente;

2) Aplica-se uma das estratégias de controle a uma proporção ($\psi_0 = 5\%, 10\% \text{ e } 20\%$) dos vértices;

2.1) No caso da restrição com rearranjo, rearranja-se de forma aleatória as arestas dos vértices que enviavam e/ou recebiam do vértice restrito.

3) Para cada unidade de tempo de simulação ($T=365*5=1825$ dias):

3.1) Calcula-se a probabilidade de cada vértice suscetível adquirir a infecção:

3.1.1) **Devido à movimentação de animais**, baseado na seguinte equação:

$$p_i = 1 - (1 - \lambda_1)^{V_i}, \text{ onde:}$$

p_i : probabilidade do vértice i adquirir a infecção devido à movimentação;

λ_1 : probabilidade de propagação da doença em uma movimentação ($\lambda_1=0.05, 0.1, 0.4, 0.7 \text{ e } 1$);

V_i : número de vértices infectados que movimentam animais para o vértice i .

3.1.2) **Devido à proximidade dos estabelecimentos**, baseado na seguinte equação:

$$p_{pi} = 1 - (1 - \lambda_2)^{V_{pi}}, \text{ onde:}$$

p_{pi} : probabilidade do vértice i adquirir a infecção devido à proximidade;

λ_2 : probabilidade de propagação da doença devido à proximidade ($\lambda_2 = 0.01$ e 0.05);
 V_{pi} : número de vértices infectados que estão próximos geograficamente ao vértice i .

3.2) Determinam-se quais vértices suscetíveis adquiriram a infecção neste passo:

Se $p_i \sim \text{Uniforme}(0,1) \leq p_i$ ou, se $p_i \sim \text{Uniforme}(0,1) \leq p_{pi}$, o vértice adquire a infecção;

3.2.1) No caso da brucelose, para cada vértice que adquiriu a infecção em (3.2), gera-se o tempo $\omega_i \sim \text{Distribuição Uniforme}(\text{mínimo}=1, \text{máximo}=463)$ que o vértice i ficará no estado latente, e ao final deste tempo o vértice será infectado.

3.2.2) Para as outras doenças, para cada vértice que adquiriu a infecção em (3.2), gera-se o tempo γ_i (em dias) que o vértice i ficará infectado, dependendo da doença que se está simulando:

a) **Doença aguda com parâmetros hipotéticos**: $\gamma_i \sim \text{Distribuição Binomial}(nI=180, pI \approx 0.167)$. Cujas aproximações à Distribuição Normal são: $\gamma_i \sim \text{Distribuição Normal}(\text{média}=30, \text{variância}=25)$;

b) **Doença crônica com parâmetros hipotéticos**: $\gamma_i \sim \text{Distribuição Binomial}(nI=498, pI \approx 0.722)$. Cujas aproximações à Distribuição Normal são: $\gamma_i \sim \text{Distribuição Normal}(\text{média}=360, \text{variância}=100)$;

c) **Febre Aftosa**: $\gamma_i \sim \text{Distribuição Uniforme}(\text{mínimo}=5, \text{máximo}=40)$;

3.3) No caso da brucelose, decresce-se em 1 unidade o tempo de duração da latência dos vértices que já estavam no estado latente, verificando se algum destes tornou-se infectado;

3.3.1) Para cada vértice que se tornou infectado em (3.3.1), gera-se o tempo $\gamma_i = \text{Tempo total simulado} + 100 = 1925$, referente à **brucelose**.

3.4) Decresce-se em 1 unidade o tempo de duração da doença dos vértices que já estavam infectados, verificando se algum destes deixou de ser infectado;

3.4.1) No caso das simulações com as redes hipotéticas, para cada vértice que se tornou recuperado em (3.3), gera-se o tempo δ_i (em dias) que o vértice i ficará neste estado:

a) **Proteção curta com parâmetros hipotéticos**: $\delta_i \sim \text{Binomial}(nR=406, pR \approx 0.444)$. Cujas aproximações à Distribuição Normal são: $\delta_i \sim \text{Normal}(\text{média}=180, \text{variância}=100)$;

b) **Proteção longa com parâmetros hipotéticos**: $\delta_i \sim \text{Binomial}(nR=498, pR \approx 0.722)$. Cujas aproximações à Distribuição Normal são: $\delta_i \sim \text{Normal}(\text{média}=360, \text{variância}=100)$;

3.5) Decresce-se em 1 unidade o tempo de duração da proteção dos vértices que estavam recuperados, verificando se algum destes se tornou suscetível;

3.6) Atualiza-se o estado dos vértices.

Ajustando-se os parâmetros cabíveis para cada simulação que se desejava realizar, calculou-se a média de prevalência de 100 simulações, para cada combinação de proximidade, tipo de controle, estratégia de controle, tipo de doença, duração de imunidade, π_0 , λ_1 , ψ_0 e λ_2 .

3.11 ANÁLISE DE RISCO

A seguir, apresenta-se como foi realizada a análise de risco que foi aplicada para as simulações do controle das doenças com parâmetros reais, implementada no programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2010).

Em uma matriz QT, composta por 79.551 linhas (vértices) e 100 colunas (simulações), guardou-se a quantidade de tempo que cada vértice ficou infectado em cada simulação, tomando o cuidado de desconsiderar o tempo da primeira infecção dos vértices sorteados no primeiro passo de cada simulação.

Então, numa primeira análise, criou-se uma nova matriz onde transformaram-se as entradas da matriz QT maiores que 0 em 1; E, somou-se cada linha dessa nova matriz, obtendo um vetor com a quantidade de simulações que cada vértice foi infectado; então, dividiu-se cada entrada desse vetor pelo total de simulações realizadas. Obtendo assim a proporção de vezes que cada vértice foi infectado em todas as simulações realizadas. Os resultados são apresentados em boxplots e em quadros que resumem as principais medidas.

Outra análise realizada, foi calcular a média de tempo em cada linha da matriz QT; então dividiu-se cada entrada do novo vetor, pelo tempo total simulado. Obtendo assim a proporção de tempo médio que cada vértice ficou infectado. Os resultados são apresentados em boxplots e em quadros que resumem as principais medidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, apresentam-se e discutem-se os resultados do presente trabalho, optando-se, para facilitar o entendimento, por apresentar um cenário que seja mais representativo do que se observou em cada conjunto de simulações.

4.1 ESPALHAMENTO DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS NA REDE MT1 E NAS REDES HIPOTÉTICAS

Nas simulações com a doença aguda, independente da duração da proteção, temos que a doença tende a desaparecer em todas as redes estudadas (Figuras 4.1.1 e 4.1.2). Uma possível causa para este efeito pode ser a estrutura das redes a qual pode dificultar o espalhamento de doenças agudas.

Comparando as curvas de prevalência das doenças em cada modelo de rede, temos que o padrão apresentado é parecido em todas as redes, ficando a diferença no patamar atingido pela prevalência da doença em cada modelo de rede (Figuras 4.1.1 e 4.1.2).

Figura 4.1.1 – Curvas de prevalência de uma doença aguda de proteção curta (a) e de uma doença aguda de proteção longa (b) nas redes estudadas ($\pi_0=0.2$, $\lambda_1=1$, $\epsilon_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), nos primeiros momentos das simulações

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Nos casos em que $\pi_0=0.2$, as redes hipotéticas usadas apresentaram prevalências superestimadas em relação à prevalência da rede do Estado de Mato Grosso, sendo que a rede gerada pelo Método A foi a que apresentou os valores mais altos de prevalência, seguida pelas redes Kalisky e Molloy-Reed, as quais apresentam valores de prevalência muito próximos e pela rede Método B (Figura 4.1.1). Já para os casos $\pi_0=0.5$ e $\pi_0=0.8$, as prevalências observadas entre os modelos de rede foram muito semelhantes (Figura 4.1.2).

Figura 4.1.2 – Curvas de prevalência de uma doença aguda de proteção curta (a) e de uma doença aguda de proteção longa (b) nas redes estudadas ($\pi_0=0.5$, $\lambda_1=0.05$, $\epsilon_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), nos primeiros momentos das simulações

Rede MT1 e Redes Hipotéticas, Modelo SIRS, $\pi_0=0.5$, $\lambda_1=0.05$, $\epsilon_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Nas simulações com a doença crônica, independente da duração da proteção, temos que a doença tende a se manter em todos os modelos de redes estudados (Figura 4.1.3).

Comparando as curvas de prevalência das doenças em cada modelo de rede, temos que o padrão apresentado é parecido em todas as redes, ficando a diferença no patamar atingido pela prevalência da doença em cada modelo de rede (Figura 4.1.3).

As redes hipotéticas usadas apresentaram prevalências superestimadas em relação à prevalência da rede do Estado de Mato Grosso, sendo que a rede gerada pelo Método A é a que apresenta os valores mais altos de prevalência, seguida pelas redes Kalisky e Molloy-Reed, as quais apresentam valores de prevalência muito próximos e pela rede Método B (Figura 4.1.3).

Além disso, nas simulações com a doença crônica de proteção curta (Figura 4.1.3 a), observa-se a formação de dois patamares de equilíbrio, denotando a perda da proteção por parte de alguns vértices e a consequente introdução da infecção nos mesmos.

Figura 4.1.3 – Curvas de prevalência de uma doença crônica de proteção curta (a) e de uma doença crônica de proteção longa (b) nas redes estudadas ($\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\epsilon_0=0.2$)

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Uma possível aplicação desses resultados seria considerar a prevalência observada nas redes hipotéticas como um limite superior que a prevalência da doença poderia atingir nesta rede, talvez devido à ocorrência de movimentações de animais que não foram registradas.

4.2 CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS

Nesta seção apresentam-se os resultados das simulações do controle de doenças com parâmetros hipotéticos que se espalham apenas pela rede MT2, pela rede MT2 e pelas redes de proximidade e apenas pelas redes de proximidade.

4.2.1 Espalhamento apenas pela rede MT2

Nesta seção, devido às diferenças obtidas nas simulações, apresentam-se os resultados da Imunização e da Restrição Sem Rearranjo separadamente dos resultados da Restrição Com Rearranjo.

4.2.1.1 Imunização e restrição sem rearranjo

Na imunização e na restrição sem rearranjo observa-se a redução das prevalências, tanto para a doença aguda quanto para a doença crônica (Figuras 4.2.1.1.1 e 4.2.1.1.2), sendo os resultados semelhantes para ambos os tipos de controle, pois, no modelo, supôs-se que a imunização seria perfeita, assim, neste caso, esta se assemelharia à restrição sem rearranjo.

Todas as estratégias de controle empregadas diminuíram a prevalência da doença, sendo, em geral, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação dos animais as que mais reduziram a prevalência (chegando em alguns casos, a fazer a doença desaparecer), seguidas pelas estratégias baseadas no paradoxo da amizade. No cenário apresentado, a estratégia que mais diminuiu a prevalência foi a estratégia Ktotal, seguida pelas estratégias, Kin, Kout, ParadoxRandom3, ParadoxRandom1 e Uniform, respectivamente (Figuras 4.2.1.1.1 e 4.2.1.1.2). Sendo importante destacar que as estratégias baseadas no paradoxo da amizade selecionaram uma proporção de vértices a serem protegidos, menor que a proporção das outras estratégias empregadas (Quadro 4.2.1.1.1).

Quadro 4.2.1.1.1 – Proporção de vértices protegidos para cada valor de ψ_0 e cada estratégia de controle

Estratégia	$\psi_0=5\%$	$\psi_0=10\%$	$\psi_0=20\%$
Uniform			
Kin			
Kout			
Ktotal	5%	10%	20%
ParadoxRandom1	~ 4,56%	~ 8,75%	~ 16,18%
ParadoxRandom3	~ 2,60%	~ 5,05%	~ 9,61%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Estes resultados vão ao encontro dos apresentados por May e Lloyd (2001) onde os autores observaram que os vértices mais conectados na rede têm um papel crucial no espalhamento de uma infecção, sendo uma importante implicação que programas de controle deveriam selecionar os vértices mais conectados, e assim, tais programas seriam mais efetivos que aqueles que selecionam vértices aleatoriamente.

Figura 4.2.1.1.1 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) na rede MT2, controle por imunização ($\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.2.1.1.2 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) na rede MT2, controle por restrição sem rearranjo ($\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

4.2.1.2 Restrição com rearranjo

Na restrição com rearranjo observa-se o aumento da prevalência das doenças (Figura 4.2.1.2.1), razão pela qual optou-se por separar os resultados, indicando que apesar de proteger alguns estabelecimentos da rede, esta se reorganizou facilitando o espalhamento das doenças.

Todas as estratégias de controle empregadas aumentaram a prevalência das doenças. Neste contexto, em geral, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação dos animais foram as que mais aumentaram a prevalência. No cenário apresentado, para a doença aguda, a estratégia Kin é a que apresenta os maiores valores de prevalência, seguida pelas estratégias, Ktotal, Kout, Uniform, ParadoxRandom3 e ParadoxRandom1, respectivamente (Figura 4.2.1.2.1a). E, para a doença crônica, a estratégia ParadoxRandom3, apresenta valores de prevalência maiores que a estratégia Uniform (Figura 4.2.1.2.1b).

Estes resultados vão ao encontro dos achados por Robinson et al. (2007) num estudo utilizando a rede da Grã-Bretanha em que se observou que, apesar da implantação da restrição da movimentação de bovinos, a rede se reorganizou aumentando o potencial tamanho de epidemias de doenças infecciosas que poderiam vir a ocorrer nesta rede.

No presente trabalho, o rearranjo das arestas que entram e/ou saem de um vértice restrito foi realizado de forma aleatória, o que pode ter feito com que vértices distantes geograficamente se conectassem, algo que provavelmente não aconteceria numa situação real. Assim, uma alternativa de modelagem seria limitar a distância dos rearranjos utilizando a informação da distância geográfica ou a informação da comunidade na rede a que o vértice pertence. Outro fator que pode ter contribuído para o efeito observado é que as estratégias que rearranjam mais arestas, podem eventualmente criar mais caminhos que facilitem o espalhamento de doenças explicando assim o aumento da prevalência observado nas simulações.

Uma aplicação prática dessas simulações seria o de avaliar o efeito da implantação da restrição de movimentação, onde os resultados sem rearranjo podem ser vistos como o melhor cenário que pode ser obtido, enquanto que as simulações com rearranjo aleatório representariam o pior cenário possível, permitindo assim avaliar potenciais prejuízos de se adotar esse tipo de controle.

Figura 4.2.1.2.1 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) na rede MT2, controle por restrição com rearranjo ($\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráfico interno), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

4.2.2 Espalhamento pela rede MT2 e pelas redes de proximidade

Considerando os tipos de controle empregados, tanto a imunização quanto a restrição sem rearranjo reduzem a prevalência das doenças. Sendo que, na imunização observa-se prevalências mais baixas que na restrição sem rearranjo (Figuras 4.2.2.1 a 4.2.2.4). Isto provavelmente se deve à inserção do espalhamento pela proximidade dos estabelecimentos (que também justifica as diferenças com os resultados da seção 4.2.1), pois na restrição sem rearranjo os estabelecimentos agora podem se infectar por estarem próximos geograficamente de um estabelecimento infectado, enquanto que os estabelecimentos imunizados não podem ser infectados devido à transmissão pela rede de proximidade.

Todas as estratégias de controle empregadas diminuíram a prevalência das doenças, sendo que, em geral, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação dos animais apresentaram resultados próximos aos da estratégia Uniform. Nos cenários apresentados, nas simulações utilizando a imunização, independentemente da distância de proximidade, a estratégia Ktotal é a que mais reduz a prevalência das doenças, seguida pelas estratégias, Kout, Kin (as quais apresentam resultados muito próximos), Uniform, ParadoxRandom3 e ParadoxRandom1, respectivamente (Figuras 4.2.2.1 e 4.2.2.2).

Figura 4.2.2.1 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) na rede MT2 e na rede de proximidade 5km, controle por imunização ($\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Rede MT2 e Rede de Proximidade 5km, Modelo SIS, Imunização, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.2.2.2 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) na rede MT2 e na rede de proximidade 10km, controle por imunização ($\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Rede MT2 e Rede de Proximidade 10km, Modelo SIS, Imunização, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Já nas simulações com restrição sem rearranjo, para a distância de 5 km, tem-se que a estratégia Ktotal é a que mais reduz a prevalência das doenças, seguida pelas estratégias, Kin, Kout, ParadoxRandom3, ParadoxRandom1 e Uniform, respectivamente (Figura 4.2.2.3). Aqui, vale observar que no caso da doença crônica, os valores de prevalência obtidos para cada estratégia de controle, são muito próximos uns dos outros.

Figura 4.2.2.3 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) na rede MT2 e na rede de proximidade 5km, controle por restrição sem rearranjo ($\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Rede MT2 e Rede de Proximidade 5km, Modelo SIS, Restrição Sem Rearranjo, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

E para a distância de 10 km, temos o mesmo resultado que para 5 km, com a diferença de que, para a doença crônica, a estratégia Kout reduz mais a prevalência do que a estratégia Kin (Figuras 4.2.2.4). Sendo que em ambas as doenças, os resultados de prevalência obtidos para cada estratégia de controle são muito próximos uns dos outros.

Figura 4.2.2.4 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) na rede MT2 e na rede de proximidade 10km, controle por restrição sem rearranjo ($\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Rede MT2 e Rede de Proximidade 10km, Modelo SIS, Restrição Sem Rearranjo, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

4.2.3 Espalhamento apenas pelas redes de proximidade

Nesta seção, como a informação usada na escolha dos vértices a serem protegidos foi diferente, apresentam-se os resultados dessas simulações separadamente.

4.2.3.1 Usando os graus da rede MT2

A imunização reduz a prevalência das doenças. Todas estratégias de controle empregadas diminuem a prevalência das doenças sendo que, em geral, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação dos animais apresentaram resultados muito próximos aos da estratégia Uniform. No cenário apresentado, a Estratégia Kout é a que mais reduz a prevalência das doenças, seguida pelas estratégias Ktotal, Uniform, Kin, ParadoxRandom3 e ParadoxRandom1, respectivamente (Figura 4.2.3.1.1 e 4.2.3.1.2).

Figura 4.2.3.1.1 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) rede de proximidade 5km, controle por imunização ($\pi_0=0.2$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.2.3.1.2 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) rede de proximidade 10km, controle por imunização ($\pi_0=0.2$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Rede de Proximidade 10km, Modelo SIS, Imunização, $\pi_0=0.2$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

4.2.3.2 Usando os graus das redes de proximidade

A imunização reduz a prevalência das doenças. Analisando as estratégias de controle utilizadas, tem-se que, em geral, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de proximidade geográfica apresentaram resultados muito próximos aos da estratégia Uniform. No cenário apresentado, a Estratégia ParadoxRandom3 é a que mais reduz a prevalência das doenças, seguida pelas estratégias Uniform, Kin, Kout, Ktotal e ParadoxRandom1, respectivamente (Figuras 4.2.3.2.1 e 4.2.3.2.2). Nesta abordagem, é importante destacar que a estratégia ParadoxRandom3 seleciona a mesma proporção de vértices a serem protegidos que as estratégias Uniform, Kin, Kout e Ktotal.

Uma possível justificativa para a estratégia ParadoxRandom3 apresentar um melhor desempenho que as outras estratégias é que além dela selecionar um número de vértices aproximadamente igual ao das outras estratégias (Quadros 4.2.3.2.1 e 4.2.3.2.2), as distribuições de graus das redes de proximidade não seguem uma distribuição de lei de potência (Figuras 4.2.3.2.3 e 4.2.3.2.4), pois em redes cuja distribuição de graus segue uma distribuição de lei de potência, os vértices mais conectados desempenham um papel importante no espalhamento de uma doença.

Quadro 4.2.3.2.1 – Proporção de vértices protegidos para cada valor de ψ_0 e cada estratégia de controle, rede de proximidade de 5km

Estratégia	$\psi_0=5\%$	$\psi_0=10\%$	$\psi_0=20\%$
Uniform			
Kin	5%	10%	20%
Kout			
Ktotal			
ParadoxRandom1	~ 4,77%	~ 9,31%	~ 17,78%
ParadoxRandom3	5%	10%	20%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Quadro 4.2.3.2.2 – Proporção de vértices protegidos para cada valor de ψ_0 e cada estratégia de controle, rede de proximidade de 10km

Estratégia	$\psi_0=5\%$	$\psi_0=10\%$	$\psi_0=20\%$
Uniform			
Kin	5%	10%	20%
Kout			
Ktotal			
ParadoxRandom1	~ 4,83%	~ 9,42%	~ 17,94%
ParadoxRandom3	5%	10%	20%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.2.3.2.1 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) rede de proximidade 5km, controle por imunização ($\pi_0=0.2$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Rede de Proximidade 5km, Modelo SIS, Imunização, $\pi_0=0.2$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.2.3.2.2 - Curvas de prevalência de uma doença aguda (a) e de uma doença crônica (b) rede de proximidade 10km, controle por imunização ($\pi_0=0.2$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$). E as mesmas curvas (gráficos internos), numa aproximação maior a fim de facilitar a visualização da distinção entre as curvas

Rede de Proximidade 10km, Modelo SIS, Imunização, $\pi_0=0.2$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.2.3.2.3 – Distribuição de graus da rede de proximidade de 5km (a) e da rede de proximidade de 10km (b). Observa-se que ambas não seguem uma distribuição lei de potência

Distribuição de Ktotal de Proximidade

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.2.3.2.4 – Distribuição de graus da rede de proximidade de 5km (a) e da rede de proximidade de 10km (b), na escala log-log. Observa-se que ambas não seguem uma distribuição lei de potência

Distribuição de Ktotal de Proximidade - Escala log-log

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

4.3 CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS REAIS

Nesta seção, apresentam-se os resultados das simulações do controle de doenças usando os parâmetros da brucelose (doença crônica) e da febre aftosa (doença aguda).

4.3.1 Brucelose com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica

Tanto a imunização quanto a restrição sem rearranjo reduzem a prevalência da brucelose, sendo os resultados semelhantes para ambos os tipos de controle (Figuras 4.3.1.1 e 4.3.1.2).

Todas as estratégias de controle empregadas diminuíram a prevalência da doença, sendo, em geral, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação dos animais, seguidas pelas estratégias baseadas no paradoxo da amizade, as que mais reduziram a prevalência (resultado semelhante ao observado nas simulações das doenças hipotéticas usando apenas a rede de movimentação de animais), apesar de que na rede MT2 dinâmica, os resultados de todas as estratégias foram muito próximos. No cenário apresentado, a estratégia

Ktotal é a que mais reduziu a prevalência, seguida pelas estratégias, Kin, Kout, ParadoxRandom3, ParadoxRandom1 e Uniform, respectivamente (Figuras 4.3.1.1 e 4.3.1.2).

Comparando os resultados da figura 4.3.1.1 com os da figura 4.3.1.2, observa-se que os valores de prevalência na rede dinâmica são menores que os da rede estática, sugerindo um possível efeito protetor da dinâmica da rede no espalhamento da doença.

Figura 4.3.1.1 – Curvas de prevalência obtidas das simulações usando a imunização (a) e restrição sem rearranjo (b), no controle da brucelose, com espalhamento pela rede MT2 estática

Rede MT2 estática, Modelo SLI, Brucelose, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.3.1.2 – Curvas de prevalência obtidas das simulações usando a imunização (a) e restrição sem rearranjo (b), no controle da brucelose, com espalhamento pela rede MT2 dinâmica

Rede MT2 dinâmica, Modelo SLI, Brucelose, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Analisando os boxplots das figuras 4.3.1.3 e 4.3.1.4, tem-se que a imunização e a restrição sem rearranjo apresentam resultados semelhantes.

Em geral, o primeiro quartil de todos os boxplots encontra-se em 0%, indicando que pelo menos um quarto dos vértices não foram infectados em nenhuma simulação, até mesmo na situação sem controle. Além disso, a mediana e o intervalo interquartil dos boxplots das situações onde foi aplicada alguma estratégia de controle são menores que os da situação sem controle (mediana: 14% das simulações e 12% do tempo na rede MT2 estática, e 2% das simulações e 1% das simulações na rede MT2 dinâmica), indicando que com a introdução das estratégias de controle houve uma diminuição tanto na quantidade de simulações quanto na quantidade de tempo que os vértices ficaram infectados e essas quantidades passaram a ficar mais parecidas dentro de cada estratégia de seleção dos vértices, destacando-se as estratégias baseadas nos graus de movimentação dos animais, as quais apresentam as menores medianas (mediana de K_{in} , K_{out} e K_{total} estão em 0%, independentemente da rede, tanto na porcentagem de simulações quanto na porcentagem de tempo) e intervalos interquartis.

Comparando os resultados na rede MT2 estática e dinâmica, tem-se que os boxplots na rede MT2 dinâmica apresentam medianas e intervalos interquartis menores que os na rede MT2 estática (Quadros 4.3.1.1 e 4.3.1.2), sugerindo um possível efeito protetor da dinâmica da rede no espalhamento da doença.

Observa-se também a presença de outliers na região acima do limite superior dos boxplots, sendo que na rede MT2 estática estes estão presentes nas situações onde se aplicaram as estratégias K_{in} , K_{out} , K_{total} , ParadoxRandom1 e ParadoxRandom3 e na rede MT2 dinâmica estes estão presentes em todas as situações (Quadros 4.3.1.1 e 4.3.1.2), indicando que alguns vértices foram infectados mais vezes e ficaram mais tempo no estado infectado do que se esperaria, sugerindo assim um possível estudo que identifique estes vértices e verifique se os mesmos possuem alguma característica em relação à movimentação de animais que favoreça tal comportamento além de avaliar o efeito na prevalência da doença ao se aplicar estratégias de controle nesses vértices. Aqui, destaca-se a estratégia K_{total} , por apresentar as maiores quantidades de outliers acima do terceiro quartil, 21,8% das simulações e 21,7% do tempo, na rede estática; 24,5% das simulações e do tempo, na rede dinâmica.

Figura 4.3.1.3 – Boxplots mostrando a porcentagem de simulações que um vértice foi infectado, considerando o espalhamento da brucelose pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.3.1.4 – Boxplots mostrando a porcentagem de tempo que um vértice ficou no estado infectado, considerando o espalhamento da brucelose pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Quadro 4.3.1.1 - Quantidade de outliers e sua frequência relativa em relação ao total de vértices; mínimo, 1º quartil, mediana, média, 3º quartil e máximo relativos à porcentagem de simulações que um vértice foi infectado, considerando o espalhamento da brucelose pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	min	Q1	mediana	média	Q3	máx
MT2 estática	Imunização e Restrição sem rearranjo	Sem controle	0	0,0%	0,0%	0,0%	14,0%	29,7%	75,0%	95,0%
		Uniform	0	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%	19,7%	43,0%	76,0%
		Kin	1301	1,6%	0,0%	0,0%	0,0%	6,2%	14,0%	64,0%
		Kout	7818	9,8%	0,0%	0,0%	0,0%	8,7%	13,0%	88,0%
		Ktotal	17345	21,8%	0,0%	0,0%	0,0%	5,6%	4,0%	78,0%
		ParadoxRandom1	199	0,3%	0,0%	0,0%	8,0%	18,5%	33,0%	90,0%
		ParadoxRandom3	3681	4,6%	0,0%	0,0%	6,0%	13,8%	22,0%	90,0%
MT2 dinâmica	Imunização e Restrição sem rearranjo	Sem controle	7901	9,9%	0,0%	0,0%	2,0%	6,3%	7,0%	93,0%
		Uniform	8046	10,1%	0,0%	0,0%	1,0%	4,5%	5,0%	73,0%
		Kin	4815	6,1%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	2,0%	30,0%
		Kout	9018	11,3%	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	2,0%	81,0%
		Ktotal	19480	24,5%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	0,0%	29,0%
		ParadoxRandom1	8938	11,2%	0,0%	0,0%	0,0%	4,2%	4,0%	88,0%
		ParadoxRandom3	6198	7,8%	0,0%	0,0%	0,0%	3,2%	4,0%	81,0%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Quadro 4.3.1.2 – Quantidade de outliers e sua frequência relativa em relação ao total de vértices; mínimo, 1º quartil, mediana, média, 3º quartil e máximo relativos à porcentagem de tempo que um vértice ficou no estado infectado, considerando o espalhamento da brucelose pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	min	Q1	mediana	média	Q3	máx
MT2 estática	Imunização e Restrição sem rearranjo	Sem controle	0	0,0%	0,0%	0,0%	12,1%	23,4%	54,2%	80,3%
		Uniform	0	0,0%	0,0%	0,0%	8,7%	15,8%	32,1%	65,5%
		Kin	745	0,9%	0,0%	0,0%	0,0%	5,1%	12,0%	43,1%
		Kout	7413	9,3%	0,0%	0,0%	0,0%	7,2%	11,1%	75,9%
		Ktotal	17241	21,7%	0,0%	0,0%	0,0%	4,7%	3,6%	60,0%
		ParadoxRandom1	1423	1,8%	0,0%	0,0%	6,7%	14,8%	25,6%	77,7%
MT2 dinâmica	Imunização e Restrição sem rearranjo	ParadoxRandom3	3858	4,9%	0,0%	0,0%	4,5%	11,2%	17,8%	78,4%
		Sem controle	7763	9,8%	0,0%	0,0%	0,6%	2,9%	3,1%	69,5%
		Uniform	7908	9,9%	0,0%	0,0%	0,3%	2,1%	2,3%	55,9%
		Kin	12400	15,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0,6%	19,4%
		Kout	13074	16,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	0,7%	57,4%
		Ktotal	19480	24,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0,0%	15,8%
		ParadoxRandom1	8458	10,6%	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%	2,0%	61,2%
		ParadoxRandom3	7878	9,9%	0,0%	0,0%	0,0%	1,5%	1,6%	60,5%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

4.3.2 Febre aftosa com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica e pelas redes de proximidade

Nas simulações com a rede MT2 estática, considerando os tipos de controle empregados, tanto a imunização quanto a restrição sem rearranjo reduzem a prevalência da doença. Sendo que, na imunização observa-se prevalências mais baixas que na restrição sem rearranjo (Figuras 4.3.2.1 e 4.3.2.2).

Todas as estratégias de controle empregadas diminuem a prevalência da doença, sendo, em geral, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de animais as que mais reduziram a prevalência. No cenário apresentado, considerando a imunização e independentemente da distância de proximidade, a estratégia Ktotal é a que mais reduziu a prevalência, seguida pelas estratégias, Kin, Kout, Uniform, ParadoxRandom3 e ParadoxRandom1, respectivamente (Figuras 4.3.2.1a e 4.3.2.2a).

Figura 4.3.2.1 – Curvas de prevalência obtidas das simulações usando a imunização (a) e restrição sem rearranjo (b), no controle da febre aftosa, com espalhamento pela rede MT2 estática e pela rede de proximidade de 5km

Rede MT2 estática e Rede de Proximidade 5km, Modelo SIS, Febre Aftosa, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Já no cenário com restrição sem rearranjo, independentemente da distância de proximidade, tem-se, a estratégia Ktotal é a que mais reduz a prevalência das doenças, seguida pelas estratégias Kin, Kout, ParadoxRandom3, ParadoxRandom1 e Uniform respectivamente (Figuras 4.3.2.1b e 4.3.2.2b).

Figura 4.3.2.2 – Curvas de prevalência obtidas das simulações usando a imunização (a) e restrição sem rearranjo (b), no controle da febre aftosa, com espalhamento pela rede MT2 estática e pela rede de proximidade de 10km

Rede MT2 estática e Rede de Proximidade 10km, Modelo SIS, Febre Aftosa, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Nas simulações com a rede MT2 dinâmica, considerando os tipos de controle empregados, a imunização reduz a prevalência da doença, enquanto a restrição sem rearranjo parece ter pouco efeito na redução da prevalência (Figuras 4.3.2.3 e 4.3.2.4). Isso se dá, muito provavelmente, pela estratégia de restrição sem rearranjo, não controlar o espalhamento pelas redes de proximidade, o que implica que a prevalência observada se dá principalmente devido ao espalhamento pelas redes de proximidade.

Na imunização, todas as estratégias de controle empregadas diminuem a prevalência das doenças. Sendo que, na imunização, em geral, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de animais apresentaram resultados muito próximos aos da estratégia Uniform (resultado semelhante ao observado nas simulações das doenças hipotéticas quando se combinou a rede de movimentação e a rede de proximidade geográfica). No cenário apresentado, considerando a imunização e independentemente da distância de proximidade, a estratégia Kout é a que mais reduziu a prevalência, seguida pelas estratégias, Ktotal, Kin, Uniform, ParadoxRandom3 e ParadoxRandom1, respectivamente (Figuras 4.3.2.3a e 4.3.2.4a).

Figura 4.3.2.3 – Curvas de prevalência obtidas das simulações usando a imunização (a) e restrição sem rearranjo (b), no controle da febre aftosa, com espalhamento pela rede MT2 dinâmica e pela rede de proximidade de 5km

Rede MT2 dinâmica e Rede de Proximidade 5km, Modelo SIS, Febre Aftosa, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Já no cenário com restrição sem rearranjo, independentemente da distância de proximidade, tem-se que todas as estratégias de controle empregadas apresentam prevalências semelhantes à situação sem controle (Figuras 4.3.2.3b e 4.3.2.4b).

Figura 4.3.2.4 – Curvas de prevalência obtidas das simulações usando a imunização (a) e restrição sem rearranjo (b), no controle da febre aftosa, com espalhamento pela rede MT2 dinâmica e pela rede de proximidade de 10km

Rede MT2 dinâmica e Rede de Proximidade 10km, Modelo SIS, Febre Aftosa, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Analisando os boxplots das figuras 4.3.2.5 e 4.3.2.6, tem-se que a restrição sem rearranjo pouco influenciou na quantidade de simulações que um vértice foi infectado, já que independentemente do cenário, os boxplots são todos semelhantes ao caso sem controle, ficando a diferença na quantidade de outliers presente em cada estratégia de controle (resultado que corrobora com o que se observa nas curvas de prevalência).

Considerando as medianas e os intervalos interquartis, para imunização, tem-se que as estratégias baseadas no grau de movimentação dos animais apresentaram as mesmas medianas que o cenário sem controle (100%) enquanto as outras estratégias apresentaram valores inferiores (Quadro 4.3.2.1), já os intervalos interquartis de todas as estratégias de controle foram maiores que do cenário sem controle (exceto a estratégia Ktotal, quando usada a rede de proximidade de 10km, que apresentou o mesmo intervalo interquartil), indicando que diminuiu-se a quantidade de vértices que foram infectados em 100% das simulações, já que se observa o aumento para valores inferiores, dessa variável. Aqui, destaca-se a estratégia Uniform, por ter apresentado a menor mediana e o menor intervalo interquartil dentre as estratégias de controle (Quadro 4.3.2.1), porém pela posição do boxplot, ainda seria de se esperar que muitos dos vértices se infectem em pelo menos 77% das simulações (vértices que estão acima do primeiro quartil), caso essa estratégia venha a ser utilizada.

Comparando os resultados entre as redes MT2 estática e dinâmica, tem-se que os boxplots da rede MT2 dinâmica, considerando a rede de proximidade de 5km, apresentam intervalos interquartis maiores que os da rede MT2 estática (Quadro 4.3.2.1), sugerindo um possível efeito protetor da dinâmica da rede no espalhamento da doença, neste caso. Já, ao se considerar a rede de proximidade de 10km não se observa um comportamento tão discrepante como no da rede de proximidade de 5km, sugerindo que a partir da distância de 10km a rede de proximidade geográfica tenha mais influência no espalhamento do que a rede de movimentação de animais. Aqui, destaca-se a estratégia Kin, ao se considerar a rede de proximidade de 5km, pois na rede dinâmica esta chega a apresentar um intervalo interquartil superior ao da estratégia Kout.

Observando os outliers tanto na figura 4.3.2.5, quanto na figura 4.3.2.6, tem-se a presença destes na região abaixo do limite inferior dos boxplots, indicando que alguns vértices foram infectados menos vezes do que se esperaria naquele cenário, e na estratégia Uniform, tem-se também, alguns outliers acima do limite superior, indicando que alguns vértices foram infectados mais vezes do que se esperava nesse cenário. Estes resultados sugerem um estudo específico dos outliers que aparecem abaixo do limite inferior, principalmente os do cenário sem controle e os da restrição sem rearranjo, a fim de verificar

se existe alguma característica em relação à movimentação dos animais ou às medidas de proximidade geográfica que favoreça o comportamento observado.

O resultado que mais causa surpresa é o da estratégia Ktotal, para a rede de proximidade de 10km, pois esperava-se que esta estratégia apresentasse um resultado semelhante à pelo menos alguma das outras estratégias de controle, o que sugere um estudo específico para este cenário a fim de levantar as possíveis causas do que foi observado.

Figura 4.3.2.5 – Boxplots mostrando a porcentagem de simulações que um vértice foi infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica, em conjunto com a rede de proximidade de 5km, e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.3.2.6 – Boxplots mostrando a porcentagem de simulações que um vértice foi infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica, em conjunto com a rede de proximidade de 10km, e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Analisando os boxplots das figuras 4.3.2.7 e 4.3.2.8, tem-se que a imunização e a restrição sem rearranjo apresentaram resultados diferentes.

Considerando as medianas e os intervalos interquartis, tem-se que nas simulações usando a restrição sem rearranjo, exceto no caso com a rede MT2 estática e a rede de proximidade de 5km, dentro de cada cenário, os boxplots apresentaram medianas e intervalos interquartis muito semelhantes, indicando que a quantidade de tempo que os vértices ficaram no estado infectado foi muito semelhante. Avaliando os outros cenários, tem-se que as medianas das estratégias de controle foram menores que as medianas do cenário sem controle e os intervalos interquartis, foram maiores (Quadro 4.3.2.2), indicando que se diminuiu a

quantidade de tempo que um vértice ficou no estado infectado. Aqui, é interessante mencionar que a imunização na rede MT2 dinâmica e a rede de proximidade de 5km, nas estratégias baseadas no grau de movimentação dos animais, os primeiros quartis dos boxplots encontram-se próximos de 1%, indicando que essas estratégias diminuíram o tempo que os vértices ficaram no estado infectado, muito provavelmente, por evitarem que a doença afete um mesmo vértice diversas vezes.

Comparando os resultados entre as redes MT2 estática e dinâmica, tem-se que os boxplots da rede MT2 dinâmica, apresentam intervalos interquartis maiores que os da rede MT2 estática (Quadro 4.3.2.2), sugerindo um possível efeito protetor da dinâmica da rede no espalhamento da doença

Observando os outliers tanto na figura 4.3.2.7, quanto na figura 4.3.2.8, tem-se a presença destes na região abaixo do limite inferior dos boxplots, indicando que alguns vértices foram infectados menos vezes do que se esperaria naquele cenário, e na estratégia Uniform, para a imunização, na rede MT2 estática e a rede de proximidade de 10km, tem-se também, alguns outliers acima do limite superior, indicando que alguns vértices foram infectados mais vezes do que se esperava nesse cenário. Estes resultados sugerem um estudo específico dos outliers que aparecem abaixo do limite inferior, principalmente os do cenário sem controle, a fim de verificar se existe alguma característica em relação à movimentação dos animais ou às medidas de proximidade geográfica que favoreça o comportamento observado.

Figura 4.3.2.7 – Boxplots mostrando a porcentagem de tempo que um vértice ficou no estado infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica, em conjunto com a rede de proximidade de 5km, e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.3.2.8 – Boxplots mostrando a porcentagem de tempo que um vértice ficou no estado infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica, em conjunto com a rede de proximidade de 10km, e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Quadro 4.3.2.1 - Quantidade de outliers e sua frequência relativa em relação ao total de vértices; mínimo, 1º quartil, mediana, média, 3º quartil e máximo relativos à porcentagem de simulações que um vértice foi infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica, em conjunto com as redes de proximidade de 5km e 10km, e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

(continua)

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	mín	Q1	mediana	média	Q3	máx
MT2 estática e Proximidade 5km	Imunização	Sem controle	1345	1,7%	0,0%	100,0%	100,0%	98,8%	100,0%	100,0%
		Uniform	3279	4,1%	0,0%	77,0%	80,0%	78,3%	83,0%	94,0%
		Kin	14505	18,2%	0,0%	64,0%	100,0%	76,8%	100,0%	100,0%
		Kout	0	0,0%	0,0%	55,0%	100,0%	77,0%	100,0%	100,0%
		Ktotal	0	0,0%	0,0%	49,0%	100,0%	76,3%	100,0%	100,0%
	Restrição Sem Rearranjo	ParadoxRandom1	3424	4,3%	0,0%	82,0%	95,0%	88,3%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom3	3136	3,9%	0,0%	73,0%	86,0%	81,3%	98,0%	100,0%
		Sem controle	1345	1,7%	0,0%	100,0%	100,0%	98,8%	100,0%	100,0%
		Uniform	5754	7,2%	0,0%	100,0%	100,0%	97,9%	100,0%	100,0%
		Kin	5714	7,2%	0,0%	100,0%	100,0%	96,4%	100,0%	100,0%
MT2 dinâmica e Proximidade 5km	Imunização	Kout	4453	5,6%	0,0%	100,0%	100,0%	96,8%	100,0%	100,0%
		Ktotal	5186	6,5%	0,0%	100,0%	100,0%	96,1%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom1	4900	6,2%	0,0%	100,0%	100,0%	97,8%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom3	6228	7,8%	0,0%	100,0%	100,0%	97,3%	100,0%	100,0%
		Sem controle	11317	14,2%	0,0%	100,0%	100,0%	93,3%	100,0%	100,0%
	Restrição Sem Rearranjo	Uniform	10914	13,7%	0,0%	74,0%	79,0%	72,4%	82,0%	95,0%
		Kin	0	0,0%	0,0%	40,0%	100,0%	71,2%	100,0%	100,0%
		Kout	0	0,0%	0,0%	46,0%	100,0%	71,3%	100,0%	100,0%
		Ktotal	0	0,0%	0,0%	24,0%	100,0%	71,0%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom1	7292	9,2%	0,0%	77,0%	93,0%	82,9%	99,0%	100,0%
	Restrição Sem Rearranjo	ParadoxRandom3	4648	5,8%	0,0%	65,0%	82,0%	75,7%	97,0%	100,0%
		Sem controle	11317	14,2%	0,0%	100,0%	100,0%	93,3%	100,0%	100,0%
		Uniform	12127	15,2%	0,0%	100,0%	100,0%	92,7%	100,0%	100,0%

(continuação)

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	min	Q1	mediana	média	Q3	máx
MT2 estática e Proximidade 10km		Kin	13020	16,4%	0,0%	100,0%	100,0%	91,5%	100,0%	100,0%
		Kout	12583	15,8%	0,0%	100,0%	100,0%	91,9%	100,0%	100,0%
		Ktotal	13045	16,4%	0,0%	100,0%	100,0%	91,5%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom1	12108	15,2%	0,0%	100,0%	100,0%	92,6%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom3	12263	15,4%	0,0%	100,0%	100,0%	92,3%	100,0%	100,0%
		Sem controle	144	0,2%	0,0%	100,0%	100,0%	99,9%	100,0%	100,0%
	Imunização	Uniform	971	1,2%	0,0%	77,0%	80,0%	79,7%	83,0%	95,0%
		Kin	13345	16,8%	0,0%	67,0%	100,0%	79,4%	100,0%	100,0%
		Kout	0	0,0%	0,0%	58,0%	100,0%	79,2%	100,0%	100,0%
		Ktotal	17802	22,4%	0,0%	100,0%	100,0%	79,2%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom1	3038	3,8%	0,0%	84,0%	96,0%	89,8%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom3	2255	2,8%	0,0%	75,0%	87,0%	83,1%	99,0%	100,0%
MT2 dinâmica e Proximidade 10km	Restrição Sem Rearranjo	Sem controle	144	0,2%	0,0%	100,0%	100,0%	99,9%	100,0%	100,0%
		Uniform	1216	1,5%	0,0%	100,0%	100,0%	99,5%	100,0%	100,0%
		Kin	887	1,1%	0,0%	100,0%	100,0%	99,3%	100,0%	100,0%
		Kout	891	1,1%	0,0%	100,0%	100,0%	99,2%	100,0%	100,0%
		Ktotal	863	1,1%	0,0%	100,0%	100,0%	99,1%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom1	1042	1,3%	0,0%	100,0%	100,0%	99,4%	100,0%	100,0%
	Imunização	ParadoxRandom3	1215	1,5%	0,0%	100,0%	100,0%	99,3%	100,0%	100,0%
		Sem controle	1637	2,1%	0,0%	100,0%	100,0%	99,0%	100,0%	100,0%
		Uniform	1941	2,4%	0,0%	77,0%	80,0%	78,9%	83,0%	95,0%
		Kin	13572	17,1%	0,0%	66,0%	100,0%	78,7%	100,0%	100,0%
		Kout	0	0,0%	0,0%	57,0%	100,0%	78,6%	100,0%	100,0%
		Ktotal	18932	23,8%	0,0%	100,0%	100,0%	78,5%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom1	3338	4,2%	0,0%	83,0%	96,0%	89,1%	100,0%	100,0%

(conclusão)

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	min	Q1	mediana	média	Q3	máx
		ParadoxRandom3	2633	3,3%	0,0%	74,0%	87,0%	82,5%	99,0%	100,0%
	Restrição Sem Rearranjo	Sem controle	1637	2,1%	0,0%	100,0%	100,0%	99,0%	100,0%	100,0%
		Uniform	1784	2,2%	0,0%	100,0%	100,0%	98,8%	100,0%	100,0%
		Kin	1858	2,3%	0,0%	100,0%	100,0%	98,6%	100,0%	100,0%
		Kout	1850	2,3%	0,0%	100,0%	100,0%	98,6%	100,0%	100,0%
		Ktotal	1901	2,4%	0,0%	100,0%	100,0%	98,6%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom1	1705	2,1%	0,0%	100,0%	100,0%	98,8%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom3	1810	2,3%	0,0%	100,0%	100,0%	98,7%	100,0%	100,0%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Quadro 4.3.2.2 – Quantidade de outliers e sua frequência relativa em relação ao total de vértices; mínimo, 1º quartil, mediana, média, 3º quartil e máximo relativos à porcentagem de tempo que um vértice ficou no estado infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica, em conjunto com as redes de proximidade de 5km e 10km, e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

(continua)

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	mín	Q1	mediana	média	Q3	máx
MT2 estática e Proximidade 5km	Imunização	Sem controle	4436	5,6%	0,0%	64,4%	79,8%	72,8%	88,1%	95,6%
		Uniform	2420	3,0%	0,0%	44,0%	59,4%	54,0%	68,1%	86,4%
		Kin	0	0,0%	0,0%	15,6%	55,0%	48,8%	79,1%	95,2%
		Kout	0	0,0%	0,0%	20,2%	55,9%	49,8%	79,9%	95,2%
		Ktotal	0	0,0%	0,0%	12,3%	57,3%	48,4%	80,2%	95,2%
	Restrição Sem Rearranjo	ParadoxRandom1	1250	1,6%	0,0%	48,6%	67,0%	62,0%	80,2%	95,5%
		ParadoxRandom3	0	0,0%	0,0%	38,9%	58,4%	55,0%	73,8%	95,5%
		Sem controle	4436	5,6%	0,0%	64,4%	79,8%	72,8%	88,1%	95,6%
		Uniform	3407	4,3%	0,0%	59,3%	77,2%	69,8%	87,1%	95,5%
		Kin	0	0,0%	0,0%	51,1%	74,2%	65,2%	86,1%	95,6%
MT2 dinâmica e Proximidade 5km	Imunização	Kout	3283	4,1%	0,0%	53,9%	75,3%	66,5%	86,5%	95,6%
		Ktotal	0	0,0%	0,0%	51,2%	74,3%	65,0%	86,2%	95,6%
		ParadoxRandom1	3741	4,7%	0,0%	59,3%	77,5%	69,7%	87,2%	95,5%
		ParadoxRandom3	2938	3,7%	0,0%	56,3%	76,3%	68,2%	86,8%	95,5%
		Sem controle	0	0,0%	0,0%	42,1%	72,7%	60,9%	85,8%	95,5%
	Restrição Sem Rearranjo	Uniform	0	0,0%	0,0%	19,9%	52,4%	43,7%	65,8%	88,5%
		Kin	0	0,0%	0,0%	0,8%	49,6%	43,6%	78,1%	95,2%
		Kout	0	0,0%	0,0%	1,2%	46,3%	43,1%	77,8%	95,2%
		Ktotal	0	0,0%	0,0%	0,8%	49,6%	43,5%	79,2%	95,2%
		ParadoxRandom1	0	0,0%	0,0%	28,8%	60,8%	52,4%	77,5%	95,3%
	Restrição Sem Rearranjo	ParadoxRandom3	0	0,0%	0,0%	20,6%	52,5%	46,8%	71,2%	95,2%
		Sem controle	0	0,0%	0,0%	42,1%	72,7%	60,9%	85,8%	95,5%
		Uniform	0	0,0%	0,0%	41,9%	72,7%	60,7%	85,8%	95,4%

(continuação)

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	min	Q1	mediana	média	Q3	máx
MT2 estática e Proximidade 10km		Kin	0	0,0%	0,0%	41,4%	72,7%	60,5%	85,8%	95,6%
		Kout	0	0,0%	0,0%	41,5%	72,7%	60,6%	85,8%	95,6%
		Ktotal	0	0,0%	0,0%	41,4%	72,7%	60,5%	85,8%	95,6%
		ParadoxRandom1	0	0,0%	0,0%	41,8%	72,7%	60,7%	85,8%	95,4%
		ParadoxRandom3	0	0,0%	0,0%	41,6%	72,7%	60,7%	85,8%	95,5%
		Sem controle	6187	7,8%	0,0%	85,7%	91,1%	87,5%	94,0%	95,6%
	Imunização	Uniform	5070	6,4%	0,0%	65,0%	70,7%	68,1%	74,8%	89,6%
		Kin	0	0,0%	0,0%	54,4%	83,7%	66,8%	91,7%	95,5%
		Kout	0	0,0%	0,0%	48,4%	84,3%	66,9%	91,7%	95,5%
		Ktotal	0	0,0%	0,0%	48,7%	85,2%	66,5%	91,9%	95,5%
		ParadoxRandom1	3022	3,8%	0,0%	70,2%	82,2%	77,6%	89,7%	95,6%
		ParadoxRandom3	1916	2,4%	0,0%	60,7%	74,4%	71,0%	86,4%	95,5%
MT2 dinâmica e Proximidade 10km	Restrição Sem Rearranjo	Sem controle	6187	7,8%	0,0%	85,7%	91,1%	87,5%	94,0%	95,6%
		Uniform	6496	8,2%	0,0%	84,9%	90,7%	86,6%	93,8%	95,6%
		Kin	6809	8,6%	0,0%	83,9%	90,3%	85,5%	93,7%	95,7%
		Kout	6692	8,4%	0,0%	84,2%	90,5%	85,8%	93,8%	95,7%
		Ktotal	6805	8,6%	0,0%	83,9%	90,3%	85,4%	93,7%	95,7%
		ParadoxRandom1	6478	8,1%	0,0%	84,9%	90,8%	86,6%	93,8%	95,6%
	Imunização	ParadoxRandom3	6641	8,3%	0,0%	84,5%	90,6%	86,2%	93,8%	95,7%
		Sem controle	7230	9,1%	0,0%	83,3%	90,2%	84,4%	93,7%	95,6%
		Uniform	6762	8,5%	0,0%	62,8%	69,8%	65,3%	74,2%	88,0%
		Kin	0	0,0%	0,0%	51,6%	83,1%	65,3%	91,6%	95,5%
		Kout	0	0,0%	0,0%	45,9%	83,1%	65,1%	91,4%	95,4%
		Ktotal	0	0,0%	0,0%	33,1%	84,6%	65,2%	91,8%	95,5%
		ParadoxRandom1	4424	5,6%	0,0%	68,1%	80,9%	75,1%	89,2%	95,5%
		ParadoxRandom3	3227	4,1%	0,0%	58,5%	73,3%	68,8%	85,5%	95,5%

(conclusão)

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	mín	Q1	mediana	média	Q3	máx
	Restrição Sem Rearranjo	Sem controle	7230	9,1%	0,0%	83,3%	90,2%	84,4%	93,7%	95,6%
		Uniform	7229	9,1%	0,0%	83,3%	90,2%	84,4%	93,7%	95,6%
		Kin	7264	9,1%	0,0%	83,3%	90,2%	84,3%	93,7%	95,7%
		Kout	7245	9,1%	0,0%	83,3%	90,2%	84,4%	93,7%	95,7%
		Ktotal	7246	9,1%	0,0%	83,3%	90,2%	84,3%	93,7%	95,7%
		ParadoxRandom1	7226	9,1%	0,0%	83,3%	90,2%	84,4%	93,7%	95,6%
		ParadoxRandom3	7217	9,1%	0,0%	83,2%	90,2%	84,4%	93,7%	95,7%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

4.3.2.1 Febre aftosa com espalhamento apenas pela rede MT2 estática e dinâmica

Considerando os tipos de controle empregados, tanto a imunização quanto a restrição sem rearranjo reduzem a prevalência da doença, sendo os resultados semelhantes para ambos os tipos de controle (Figuras 4.3.2.1.1 e 4.3.2.1.2).

Na rede MT2 estática, todas as estratégias de controle empregadas diminuíram a prevalência da doença, sendo, em geral, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de animais as que mais reduziram a prevalência (chegando em alguns casos, a se observar o desaparecimento da doença), seguidas pelas estratégias baseadas no paradoxo da amizade. No cenário apresentado, a estratégia Ktotal é a que mais reduziu a prevalência, seguida pelas estratégias, Kin, Kout, ParadoxRandom3, ParadoxRandom1 e Uniform, respectivamente (Figura 4.3.2.1.1).

Já nas simulações apresentadas na figura 4.3.2.1.2, mesmo na situação sem controle, tem-se que a doença desaparece, o que pode ser um efeito protetor da dinâmica da rede, a qual dificulta o espalhamento da doença (Figura 4.3.2.1.2).

Figura 4.3.2.1.1 – Curvas de prevalência obtidas das simulações usando a imunização (a) e restrição sem rearranjo (b), no controle da febre aftosa, com espalhamento pela rede MT2 estática

Rede MT2 estática, Modelo SIS, Febre Aftosa, $\pi_0=0.2$, $\lambda_1=0.05$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.3.2.1.2 – Curvas de prevalência obtidas das simulações usando a imunização (a) e restrição sem rearranjo (b), no controle da febre aftosa, com espalhamento apenas pela rede MT2 dinâmica

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Analisando os boxplots das figuras 4.3.2.1.3 e 4.3.2.1.4, tem-se que a imunização e a restrição sem rearranjo apresentam resultados semelhantes.

Em geral, o primeiro quartil de todos os boxplots encontra-se em 0%, indicando que pelo menos um quarto dos vértices não foram infectados em nenhuma simulação, até mesmo na situação sem controle, chamando a atenção os resultados na rede MT2 dinâmica, onde até mesmo o terceiro quartil dos boxplots encontra-se em 0%, o que indica que pelo menos três quartos dos vértices não foram infectados nas simulações usando essa rede. Além disso, na rede MT2 estática, a mediana e o intervalo interquartil dos boxplots das situações onde foi aplicada alguma estratégia de controle são menores que os da situação sem controle (mediana: 9% das simulações e 0,1% do tempo), indicando que nesta situação, com a introdução das estratégias de controle houve uma diminuição tanto na quantidade de simulações quanto na quantidade de tempo que os vértices ficaram infectados e essas quantidades passaram a ficar mais parecidas dentro de cada estratégia de seleção dos vértices, destacando-se as estratégias baseadas nos graus de movimentação dos animais, as quais apresentam as menores medianas (mediana de Kin, Kout e Ktotal estão em 0%, independentemente da rede, tanto na porcentagem de simulações quanto na porcentagem de tempo) e intervalos interquartis (resultado que corrobora com os observados nas curvas de prevalência no espalhamento das doenças hipotéticas quando usada apenas a rede de movimentação de animais).

Comparando os resultados na rede MT2 estática e dinâmica, tem-se que os boxplots na rede MT2 dinâmica apresentam medianas e intervalos interquartis menores que os na rede MT2 estática (Quadros 4.3.2.1.1 e 4.3.2.1.2), sugerindo um possível efeito protetor da dinâmica da rede no espalhamento da doença.

Observa-se também a presença de outliers na região acima do limite superior dos boxplots, sendo que na rede MT2 estática, considerando a porcentagem de simulações que um vértice ficou infectado, esses estão presentes nas situações onde se aplicaram as estratégias Kin, Kout, Ktotal, ParadoxRandom1 e ParadoxRandom3 e nos outros cenários aqueles estão presentes em todas as situações (Quadros 4.3.2.1.1 e 4.3.2.1.2), indicando que alguns vértices foram infectados mais vezes e ficaram mais tempo no estado infectado do que se esperaria, sugerindo assim um possível estudo que identifique estes vértices e verifique se os mesmos possuem alguma característica em relação à movimentação de animais que favoreça tal comportamento além de avaliar o efeito na prevalência da doença ao se aplicar estratégias de controle nesses vértices. Sobre este ponto, considerando a porcentagem de simulações que um vértice ficou infectado, para a rede estática destaca-se, por apresentar as maiores quantidades de outliers, a estratégia Ktotal (21,5% de outliers) e para a rede dinâmica destaca-se o cenário sem controle (5,3% de outliers), já ao se considerar a porcentagem de tempo que um vértice ficou no estado infectado, para a rede estática, destaca-se a estratégia Uniform (21,9% de outliers) e para a rede dinâmica, tem-se o cenário sem controle (5,3% de outliers).

Figura 4.3.2.1.3 – Boxplots mostrando a porcentagem de simulações que um vértice foi infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Figura 4.3.2.1.4 – Boxplots mostrando a porcentagem de tempo que um vértice ficou no estado infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Quadro 4.3.2.1.1 - Quantidade de outliers e sua frequência relativa em relação ao total de vértices; mínimo, 1º quartil, mediana, média, 3º quartil e máximo relativos à porcentagem de simulações que um vértice foi infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	mín	Q1	mediana	média	Q3	máx
MT2 estática	Imunização e Restrição sem rearranjo	Sem controle	0	0,0%	0,0%	0,0%	9,0%	32,6%	100,0%	100,0%
		Uniform	0	0,0%	0,0%	0,0%	7,0%	21,9%	48,0%	95,0%
		Kin	875	1,1%	0,0%	0,0%	0,0%	4,4%	10,0%	38,0%
		Kout	8284	10,4%	0,0%	0,0%	0,0%	6,9%	9,0%	100,0%
		Ktotal	17137	21,5%	0,0%	0,0%	0,0%	4,0%	3,0%	70,0%
		ParadoxRandom1	6531	8,2%	0,0%	0,0%	5,0%	18,6%	28,0%	100,0%
MT2 dinâmica	Imunização e Restrição sem rearranjo	ParadoxRandom3	6619	8,3%	0,0%	0,0%	4,0%	13,0%	18,0%	100,0%
		Sem controle	4034	5,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	41,0%
		Uniform	3417	4,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	28,0%
		Kin	1151	1,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,0%
		Kout	1461	1,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	24,0%
		Ktotal	963	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,0%
		ParadoxRandom1	3091	3,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	40,0%
		ParadoxRandom3	2506	3,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	33,0%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Quadro 4.3.2.1.2 – Quantidade de outliers e sua frequência relativa em relação ao total de vértices; mínimo, 1º quartil, mediana, média, 3º quartil e máximo relativos à porcentagem de tempo que um vértice ficou no estado infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pela rede MT2 estática e pela rede MT2 dinâmica e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	mín	Q1	mediana	média	Q3	máx
MT2 estática	Imunização e Restrição sem rearranjo	Sem controle	14478	18,2%	0,0%	0,0%	0,1%	11,5%	12,6%	95,4%
		Uniform	17418	21,9%	0,0%	0,0%	0,1%	6,2%	3,0%	83,6%
		Kin	2722	3,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,7%
		Kout	8994	11,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	6,4%
		Ktotal	17252	21,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	1,3%
		ParadoxRandom1	16313	20,5%	0,0%	0,0%	0,1%	3,1%	0,7%	92,9%
MT2 dinâmica	Imunização e Restrição sem rearranjo	ParadoxRandom3	12288	15,4%	0,0%	0,0%	0,1%	0,7%	0,3%	63,2%
		Sem controle	4034	5,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%
		Uniform	3417	4,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%
		Kin	1151	1,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
		Kout	1461	1,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%
		Ktotal	963	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
		ParadoxRandom1	3091	3,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%
		ParadoxRandom3	2506	3,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

4.3.2.2 Febre aftosa com espalhamento apenas pelas redes de proximidade

A imunização reduz a prevalência da doença. Todas estratégias de controle empregadas diminuem a prevalência da doença. Sendo que, em geral, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de animais apresentaram resultados muito próximos aos da estratégia Uniform (resultado que também foi observado nas simulações das doenças hipotéticas considerando apenas as redes de proximidade geográfica). No cenário apresentado, considerando a distância de proximidade de 5km, a estratégia Kout é a que mais reduziu a prevalência, seguida pelas estratégias, Uniform, Ktotal, Kin, ParadoxRandom3 e ParadoxRandom1, respectivamente. Já para a distância de proximidade de 10km, temos os mesmos resultados anteriores, com a diferença de que a estratégia Ktotal tem um desempenho melhor que a estratégia Uniform (Figura 4.3.2.2.1).

Figura 4.3.2.2.1 - Curvas de prevalência obtidas das simulações usando a imunização, no controle da febre aftosa, com espalhamento pela rede de proximidade de 5km (a) e pela rede de proximidade de 10km (b)

Redes de Proximidade, Modelo SIS, Febre Aftosa, Imunização, $\pi_0=0.2$, $\lambda_2=0.01$, $\psi_0=0.2$

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Analisando os boxplots da figura 4.3.2.2.2, chama a atenção que na situação sem controle, a caixa encontra-se achatada em 100% com alguns outliers abaixo do limite inferior (8,3% para a distância de 5km e 1,6% para a distância de 10km), indicando que as redes de proximidade são um elemento importante a se considerar no desenvolvimento de políticas de controle, pois através delas a doença pode vir a afetar quase toda a rede.

Considerando as medianas e os intervalos interquartis, tem-se que as estratégias baseadas nos graus de movimentação dos animais apresentaram as mesmas medianas que o cenário sem controle (100%) enquanto as outras estratégias apresentaram valores inferiores (Quadro 4.3.2.2.1), já os intervalos interquartis de todas as estratégias de controle foram maiores que do cenário sem controle (exceto na rede de proximidade de 10km para a estratégia Ktotal que apresentou o mesmo intervalo), indicando que diminuiu-se a quantidade de vértices que foram infectados em 100% das simulações e consequentemente aumentou-se a dispersão dessa variável. Aqui, é interessante mencionar que a estratégia Uniform, apresentou a menor mediana (aproximadamente 80% em ambas as redes) e o menor intervalo interquartil dentre as estratégias de controle, porém pela posição do boxplot, ainda seria de se esperar que muitos dos vértices se infectem em pelo menos 77% das simulações (vértices que estão acima do primeiro quartil), caso essa estratégia venha a ser utilizada.

Onde se tem outliers, tem-se que estes aparecem abaixo do limite inferior do boxplot, indicando que alguns vértices foram infectados menos vezes do que se esperaria naquele cenário, e no cenário Uniform, tem-se também, alguns outliers acima do limite superior, indicando que alguns vértices foram infectados mais vezes do que se esperaria nesse cenário. Estes resultados sugerem um estudo específico dos outliers que aparecem abaixo do limite inferior, principalmente os do cenário sem controle, a fim de verificar existe alguma característica em relação às medidas nas redes de proximidade geográfica que favoreçam o comportamento observado.

Também chama a atenção o comportamento observado na estratégia Ktotal, para a rede de proximidade de 10km, pois se esperava que esta reduzisse mais a quantidade de vértices que se infectaram em 100% das simulações.

Figura 4.3.2.2.2 - Boxplots mostrando a porcentagem de simulações que um vértice foi infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pelas redes de proximidade de 5km e 10km, e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Analisando os boxplots da figura 4.3.2.2.3, tem-se que as medianas de todas as estratégias de controle foram menores que do cenário sem controle (92,4% na rede de proximidade de 5km e 95,2% na rede de proximidade de 10km), indicando que as estratégias diminuíram o tempo que um vértice ficou no estado infectado, já os intervalos interquartis de todas as estratégias de controle foram maiores que do cenário sem controle, indicando que se houve um aumento na dispersão do tempo que um vértice ficou no estado infectado. Assim como na figura 4.3.2.2.2, destaca-se a estratégia Uniform, por apresentar a menor mediana (71,8% na rede de proximidade de 5km e 75,3% na rede de proximidade de 10km) e o menor intervalo interquartil dentre as estratégias de controle.

Considerando os outliers, tem-se que estes aparecem abaixo do limite inferior do boxplot, indicando que alguns vértices ficaram menos tempo infectado do que se esperaria naquele cenário, e no cenário Uniform, tem-se também, alguns outliers acima do limite superior, indicando que alguns vértices ficaram mais tempo infectado do que se esperaria nesse cenário. Estes resultados reforçam a sugestão um estudo específico dos outliers como o apresentado para a figura 4.3.2.2.2.

Figura 4.3.2.2.3 – Boxplots mostrando a porcentagem de tempo que um vértice ficou no estado infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pelas redes de proximidade de 5km e 10km, e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Quadro 4.3.2.2.1 - Quantidade de outliers e sua frequência relativa em relação ao total de vértices; mínimo, 1º quartil, mediana, média, 3º quartil e máximo relativos à porcentagem de simulações que um vértice foi infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pelas redes de proximidade de 5km e 10km, e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	mín	Q1	mediana	média	Q3	máx
Proximidade 5km	Imunização	Sem controle	6604	8,3%	0,0%	100,0%	100,0%	95,7%	100,0%	100,0%
		Uniform	6660	8,4%	0,0%	76,0%	79,0%	75,8%	82,0%	94,0%
		Kin	14807	18,6%	0,0%	62,0%	100,0%	75,8%	100,0%	100,0%
		Kout	0	0,0%	0,0%	53,0%	100,0%	75,6%	100,0%	100,0%
		Ktotal	0	0,0%	0,0%	37,0%	100,0%	75,6%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom1	5261	6,6%	0,0%	81,0%	94,0%	86,0%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom3	4216	5,3%	0,0%	71,0%	85,0%	79,4%	98,0%	100,0%
Proximidade 10km	Imunização	Sem controle	1286	1,6%	0,0%	100,0%	100,0%	98,8%	100,0%	100,0%
		Uniform	1649	2,1%	0,0%	77,0%	80,0%	78,9%	83,0%	94,0%
		Kin	13700	17,2%	0,0%	67,0%	100,0%	79,0%	100,0%	100,0%
		Kout	0	0,0%	0,0%	57,0%	100,0%	78,8%	100,0%	100,0%
		Ktotal	18308	23,0%	0,0%	100,0%	100,0%	78,8%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom1	3619	4,5%	0,0%	84,0%	96,0%	89,2%	100,0%	100,0%
		ParadoxRandom3	2590	3,3%	0,0%	74,0%	87,0%	82,5%	99,0%	100,0%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

Quadro 4.3.2.2.2 – Quantidade de outliers e sua frequência relativa em relação ao total de vértices; mínimo, 1º quartil, mediana, média, 3º quartil e máximo relativos à porcentagem de tempo que um vértice ficou no estado infectado, considerando o espalhamento da febre aftosa pelas redes de proximidade de 5km e 10km, e os controles via imunização e restrição sem rearranjo, para diversas estratégias de seleção dos vértices a serem protegidos

rede	tipo	estratégia	outliers	freq_rel_outliers	mín	Q1	mediana	média	Q3	máx
Proximidade 5km	Imunização	Sem controle	9334	11,7%	0,0%	86,8%	92,4%	84,7%	94,7%	95,6%
		Uniform	9487	11,9%	0,0%	65,5%	71,8%	65,5%	75,6%	88,4%
		Kin	0	0,0%	0,0%	49,3%	87,3%	65,6%	93,4%	95,6%
		Kout	0	0,0%	0,0%	44,3%	87,1%	65,4%	93,3%	95,6%
		Ktotal	0	0,0%	0,0%	23,3%	88,5%	65,5%	93,5%	95,6%
		ParadoxRandom1	6388	8,0%	0,0%	69,7%	83,5%	75,4%	91,1%	95,6%
		ParadoxRandom3	5232	6,6%	0,0%	59,2%	75,2%	69,0%	88,0%	95,6%
Proximidade 10km	Imunização	Sem controle	9998	12,6%	0,0%	94,3%	95,2%	92,8%	95,4%	95,7%
		Uniform	3008	3,8%	0,0%	72,3%	75,3%	73,7%	78,1%	89,6%
		Kin	13916	17,5%	0,0%	62,1%	94,2%	73,8%	95,3%	95,6%
		Kout	0	0,0%	0,0%	53,5%	94,2%	73,6%	95,3%	95,6%
		Ktotal	18435	23,2%	0,0%	84,1%	94,4%	73,7%	95,3%	95,7%
		ParadoxRandom1	3561	4,5%	0,0%	78,0%	89,6%	83,6%	94,2%	95,6%
		ParadoxRandom3	2853	3,6%	0,0%	69,2%	81,3%	77,2%	92,5%	95,6%

Fonte: (OSSADA, R., 2015).

5 CONCLUSÕES

Nesta seção são apresentadas as conclusões, baseadas nos resultados deste trabalho.

5.1 ESPALHAMENTO DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS NA REDE MT1 E NAS REDES HIPOTÉTICAS

Os resultados das simulações indicam que na rede do Estado de Mato Grosso os modelos de rede estudados podem não ser as melhores alternativas caso não se tenha a informação sobre a topologia da rede real, pois nas simulações das doenças agudas quando $\pi_0=0.2$ e das doenças crônicas, observou-se a superestimação da prevalência das doenças, o que, e no caso do desenvolvimento de uma política de controle e prevenção do espalhamento de uma doença, poderia levar à realização de um investimento em recursos humanos e materiais maior que o necessário para controlar a doença. Além disso, observou-se a influência das diferentes estruturas das redes usadas no espalhamento das doenças, o que reforça a importância da incorporação da heterogeneidade das relações dos estabelecimentos nas modelagens, quando possível.

5.2 CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS HIPOTÉTICOS

Nesta seção apresentam-se as conclusões deste trabalho, baseadas nos resultados das simulações do controle de doenças com parâmetros hipotéticos que se espalham apenas pela rede MT2, pela rede MT2 e pelas redes de proximidade e apenas pelas redes de proximidade.

5.2.1 Espalhamento apenas pela rede MT2

Nesta seção, devido às diferenças obtidas nas simulações, apresentam-se as conclusões da Imunização e da Restrição Sem Rearranjo separadamente das conclusões da Restrição Com Rearranjo.

5.2.1.1 Imunização e restrição sem rearranjo

Os resultados das simulações indicam que na rede do Estado de Mato Grosso, para doenças que se espalhem apenas pela rede de movimentação de animais, considerando os tipos de controle estudados, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de animais, seguidas pelas estratégias baseadas no paradoxo da amizade são as mais indicadas, pois estas apresentam reduções na prevalência maiores que da estratégia Uniform, sendo que no cenário apresentado, a estratégia Ktotal foi a que apresentou os melhores resultados.

5.2.1.2 Restrição com rearranjo

Os resultados da restrição com rearranjo aleatório indicam que na rede do Estado de Mato Grosso, caso seja restrita a movimentação de animais e os estabelecimentos tentem buscar por novos parceiros comerciais aleatoriamente, a prevalência de doenças presentes neste sistema pode vir aumentar, mesmo com a presença de uma estratégia que visa controlar o espalhamento das doenças.

Pela observação dos resultados, também se tem a sugestão de que seria interessante modelar o rearranjo limitando-o pela distância geográfica entre os estabelecimentos, ou pela distância geográfica das movimentações de cada estabelecimento, ou aos vértices pertencentes à mesma comunidade na rede.

5.2.2 Espalhamento pela rede MT2 e pelas redes de proximidade

Os resultados indicam que na rede do Estado de Mato Grosso, para doenças que se espalham tanto pela rede de movimentação de animais como pela rede de proximidade, considerando os tipos de controle estudados, a imunização é mais eficiente que a restrição sem rearranjo. Contudo, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de animais apresentaram reduções na prevalência muito semelhantes à da estratégia Uniform, indicando que para esta situação, a estratégia Uniform, já pode ser uma boa solução a ser implementada por não necessitar do trabalho extra de se coletar a informação sobre a topologia da rede, apesar de no cenário apresentado, a estratégia Ktotal ter apresentado os melhores resultados.

5.2.3 Espalhamento apenas pelas redes de proximidade

Nesta seção, como a informação usada na escolha dos vértices a serem protegidos foi diferente, apresentam-se as conclusões dessas simulações separadamente.

5.2.3.1 Usando os graus da rede MT2

Os resultados das simulações indicam que na rede do Estado de Mato Grosso, para doenças que se espalhem apenas pelas redes de proximidade geográfica, quando se usa a informação sobre os graus de movimentação de animais da rede MT2 para selecionar os vértices em que serão aplicadas estratégias de controle, considerando os tipos de controle estudados, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de animais apresentaram reduções na prevalência muito semelhantes à da estratégia Uniform, indicando que para esta situação, a estratégia Uniform, já pode ser uma boa solução a ser implementada por não necessitar do trabalho extra de se coletar a informação sobre a topologia da rede, apesar de no cenário apresentado, a estratégia Kout ter apresentado os melhores resultados.

5.2.3.2 Usando os graus das redes de proximidade

Os resultados das simulações indicam que na rede do Estado de Mato Grosso, para doenças que se espalhem apenas pelas redes de proximidade, quando se usa a informação sobre os graus das redes de proximidade geográfica para selecionar os vértices em que serão aplicados o controle, considerando os tipos de controle estudados, as estratégias baseadas na seleção utilizando os graus das redes de proximidade geográfica e a estratégia ParadoxRandom3 apresentaram reduções na prevalência muito semelhantes à da estratégia Uniform, indicando que para esta situação, a estratégia Uniform, já pode ser uma boa solução a ser implementada por não necessitar do trabalho extra de se calcular a informação sobre a os graus dos vértices da rede de proximidade geográfica, todavia, no cenário apresentado, a estratégia ParadoxRandom3 foi a que apresentou os melhores resultados.

5.3 CONTROLE DE DOENÇAS COM PARÂMETROS REAIS

Nesta seção, apresentam-se as conclusões sobre as simulações do controle de doenças usando os parâmetros da brucelose (doença crônica) e da febre aftosa (doença aguda).

5.3.1 Brucelose com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica

Os resultados indicam que na rede do Estado de Mato Grosso, para a brucelose, considerando os tipos de controle estudados, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de animais são as mais indicadas, pois estas apresentam reduções na prevalência maiores que da estratégia Uniform, sendo que no cenário apresentado, a estratégia Ktotal foi a que apresentou os melhores resultados.

5.3.2 Febre aftosa com espalhamento pela rede MT2 estática e dinâmica, e pelas redes de proximidade

Os resultados indicam que na rede do Estado de Mato Grosso, para a febre aftosa, considerando os tipos de controle estudados, a imunização é mais eficiente que a restrição sem rearranjo, já que esta parece não reduzir a prevalência da doença. Contudo, na imunização, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de animais apresentam reduções na prevalência muito semelhantes à da estratégia Uniform, indicando que para esta situação, a estratégia Uniform, já pode ser uma boa solução a ser implementada por não necessitar do trabalho extra de se coletar a informação sobre a topologia da rede, apesar de no cenário apresentado, a estratégia Kout ter um desempenho um pouco melhor que o da estratégia Uniform.

5.3.3.1 Febre aftosa com espalhamento apenas pela rede MT2 estática e dinâmica

Os resultados indicam que na rede do Estado de Mato Grosso, considerando o espalhamento da febre aftosa apenas por meio da rede de movimentação de animais, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de animais são as mais indicadas, pois estas apresentam reduções na prevalência maiores que da estratégia Uniform, sendo que no cenário apresentado, aquelas estratégias reduzem a prevalência da doença à 0. Ao se considerar a temporalidade das movimentações, observou-se o desaparecimento natural da doença, muito provavelmente devido à baixa ocorrência de movimentações no início das simulações.

5.3.3.2 Febre aftosa com espalhamento apenas pelas redes de proximidade

Os resultados indicam que na rede do Estado de Mato Grosso, considerando o espalhamento da febre aftosa apenas por meio das redes de proximidade dos estabelecimentos, as estratégias baseadas na seleção utilizando o grau de movimentação de

animais apresentam reduções na prevalência muito semelhantes à da estratégia Uniform, indicando que para esta situação, a estratégia Uniform, já pode ser uma boa solução a ser implementada por não necessitar do trabalho extra de se coletar a informação sobre a topologia da rede, apesar de no cenário apresentado, a estratégia Kout ter um desempenho um pouco melhor que o da estratégia Uniform.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram geradas redes hipotéticas a partir da rede do Estado de Mato Grosso, onde foram simuladas doenças com parâmetros hipotéticos e se observou que as prevalências nas redes hipotéticas foram maiores que na rede real, indicando que se as redes hipotéticas apresentadas neste trabalho forem usadas no planejamento de alguma ação preventiva ou de controle, no Estado de Mato Grosso, estas devem ser usadas com cautela, pois podem levar a um uso de recursos maior do que o que seria realmente necessário. Além disso, observou-se, através das curvas de prevalência e da análise de risco da quantidade de vezes e de tempo que os vértices ficaram infectados, que as estratégias baseadas nos graus de movimentação dos animais são mais eficientes que a estratégia Uniform, tanto no controle das doenças com parâmetros hipotéticos quanto reais, quando o espalhamento da doença ocorre apenas pela rede de movimentação de animais. Nessa situação, também se observou que as estratégias baseadas no paradoxo na amizade são melhores que a estratégia Uniform, indicando que para doenças que se espalhem apenas pela rede de movimentação dos animais, mas não se conheça a topologia da rede, essas estratégias podem ser uma boa alternativa à seleção aleatória. Contudo, quando o espalhamento também se dá pelas redes de proximidade ou apenas por elas, tem-se o indicativo de que a estratégia Uniform já pode ser uma boa solução para estes casos, por não ter o requisito de se coletar qualquer informação sobre as redes, sendo esse resultado diferente do que se observa em redes que seguem uma distribuição de lei de potência. Temos também que, em geral, a imunização foi melhor que a restrição sem rearranjo, principalmente nos casos em que as doenças podiam se espalhar tanto pela rede de movimentação de animais quanto pela rede de proximidade. Por fim, vimos que a restrição com rearranjo pode levar a um aumento da prevalência de uma doença no sistema caso o rearranjo seja realizado de forma aleatória, sugerindo outro estudo a fim de avaliar outras formas de rearranjo e suas consequências no espalhamento de doenças. Assim, esperamos que

esses resultados possam contribuir para a discussão do impacto relativo entre as estratégias de controle utilizadas e que futuramente possam auxiliar nas atividades dos órgãos responsáveis pela vigilância epidemiológica, no desenvolvimento de políticas de prevenção e controle de doenças em animais além de incentivar o uso de modelos de espalhamento de doenças em conjunto com a metodologia de redes.

REFERÊNCIAS

- AMAKU, M. **Estratégias de controle de doença infecciosa em redes de trânsito animal: uma abordagem baseada no paradoxo da amizade**. 2013. 57 f. Tese de Livre Docência - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- AMARAL, L. A. N.; SCALA, A.; BARTHÉLÉMY, M.; STANLEY, H. E. Classes of small-world networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 97, p. 11149–11152, 2000.
- CLAUSET, A.; SHALIZI, C. R.; NEWMAN, M. E. J. Power-law distributions in empirical data. **Society for Industrial and Applied Mathematics Review**, v. 51, p. 661–703, 2009.
- BARABÁSI, A-L.; ALBERT, R. Emergence of scaling in random networks. **Science**, v. 286, n. 5439, p. 509-512, 1999.
- BATES, D.; MAECHLER, M. **Matrix**: sparse and dense matrix classes and methods, 2011. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=Matrix>>. Acessado em: 03 set. 2012.
- BIGRAS-POULIN, M.; BARFOD, K.; MORTENSEN, S.; GREINER, M. Relationship of trade patterns of the danish swine industry animal movements network to potential disease spread. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 80, n. 2-3, p.143-165, 2007.
- BIGRAS-POULIN, M.; THOMPSON, R. A.; CHRIEL, M.; MORTENSEN, S.; GREINER, M. Network analysis of danish cattle industry trade patterns as an evaluation of risk potential for disease spread. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 76, n. 1-2, p. 11-39, 2006.
- CSARDI, G.; NEPUSZ, T. The igraph software package for complex network research, **InterJournal, Complex Systems**, 1695, 2006. Disponível em: <<http://igraph.sourceforge.net>>. Acessado em: 03 set. 2012.
- CHRISTAKIS, N. A.; FOWLER, J. H. Social network sensors for early detection of contagious outbreaks. **Public Library of Science One**, v. 5, n. 9, e12948, 2010.
- CORRÊA, E. S.; ANDRADE, P.; EUCLIDES FILHO, K.; ALVES, R. G. O. Avaliação de um sistema de produção de gado de corte. 1. desempenho reprodutivo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, n. 6, p. 2209-2215, 2000.

FELD, S. L. Why your friends have more friends than you do. **American Journal of Sociology**, v. 96, n. 6, p. 1464-1477, 1991.

GRISI-FILHO, J. H. H.; OSSADA, R.; FERREIRA, F.; AMAKU, A. Scale-free networks with the same degree distribution: different structural properties. **Physics Research International**, v. 2013, p. 1-9, 2013.

JEONG, H. Complex scale-free networks. **Physica A**, v. 321, n. 1-2, p. 226-237, 2003.

KALISKY, T.; COHEN, R.; HAVLIN, S. Tomography and stability of complex networks. **Lecture Notes in Physics**, v. 650, p. 3-34, 2004.

KEELING, M. J.; DANON, L.; VERNON, M. C.; HOUSE, T. A. Individual identity and movement networks for disease metapopulations. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 107, n. 19, p. 8866-8870, 2010.

LINDQUIST, J.; MA, J.; VAN DEN DRIESSCHE, P.; WILLEBOORDSE, F. H. Effective degree network disease models. **Journal of Mathematical Biology**, v. 62, n. 2, p. 143-164, 2011.

LLOYD, A. L.; MAY, R. M. How viruses spread among computers and people. **Science**, v. 292, n. 5520, p. 1316-1317, 2001.

MATO GROSSO. Secretaria de Assuntos Fundiários do Estado de Mato Grosso – Instituto de Defesa Agropecuária do Estado de Mato Grosso - INDEA. Coordenadoria de Controle das Doenças dos Animais - CCDA. **Banco digitalizado de informação da vacinação**. Cuiabá: INDEA, 2008.

MAY, R. M.; LLOYD, A. L. Infection dynamics on scale-free networks. **Physical Review E**, v. 64, 066112.1–066112.4, 2001

MEYERS, L. A. Contact network epidemiology: bond percolation applied to infectious disease prediction and control. **Bulletin of the American Mathematical Society**, v. 44, n.1, p. 63-86, 2007.

NATALE, F.; GIOVANNINI, A.; SAVINI, L.; PALMA, D.; POSSENTI, L.; FIORE, G.; CALISTRI, P. Network analysis of italian cattle trade patterns and evaluation of risks for potential disease spread. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 92, n. 4, p. 341-350, 2009.

NEWMAN, M. E. J. **Networks**: an introduction. Oxford: Oxford University Press, 2010. 772 p.

OSSADA, R. **Modelagem da dinâmica de doenças infecciosas em redes de movimentação de animais**. 2011. 43 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

OSSADA, R.; GRISI-FILHO J. H. H.; FERREIRA F.; AMAKU M. Modeling the dynamics of infectious diseases in different scale-free networks with the same degree distribution. **Advanced Studies in Theoretical Physics**, v. 7, n. 16, p. 759-771, 2013.

PANAFTOSA. **Manual de procedimentos para a atenção à ocorrências de febre aftosa e outras enfermidades vesiculares**. Projeto BID/PANAFTOSA-OPAS/OMS para os países do MERCOSUL Ampliado. Rio de Janeiro: PANAFTOSA-OPAS/OMS, 2007.

PASTOR-SATORRAS, R.; VESPIGNANI, A. Epidemic spreading in scale-free networks. **Physical Review Letters**, v. 86, n. 14, p. 3200-3203, 2001.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: 2010. R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acessado em: 03 set. 2012.

ROBINSON, S. E.; EVERETT, M. G.; CHRISTLEY, R. M. Recent network evolution increases the potential for large epidemics in the British cattle population. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 4, p. 669-674, 2007.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. **Modern Applied Statistics with S**. 4. ed. New York: Springer, 2002. 512 p.

VERNON, M. C.; KEELING, M. J. Representing the UK's cattle herd as static and dynamic networks. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 276, n. 1656, p. 469-476, 2009.

WASSERMAN, S.; FAUST, K. **Social network analysis**: methods and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 825 p.

WOOLHOUSE, M. E. J.; SHAW, D. J.; MATTHEWS, L.; LIU, W-C.; MELLOR, D. J.; THOMAS, M. R. Epidemiological implications of the contact network structure for cattle farms and the 20-80 rule. **Biology Letters**, v. 1, n. 3, p. 350-352, 2005.