

# **O efeito messiânico causado pelo altruísmo patológico**

**Thiago Firmino Sousa**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Informática e de Computadores**

Orientador: Prof. Francisco João Duarte Cordeiro Correia dos Santos

### **Júri**

Presidente: Rui Filipe Fernandes Prada

Orientador: Prof. Francisco João Duarte Cordeiro Correia dos Santos

Vogal: Prof. Carlos António Roque Martinho

**Maio, 2019**



# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer o Professor Francisco Santos pela oportunidade que deu-me de explorar um tema extremamente interessante, e por toda a ajuda que proporcionou durante o desenvolvimento desta Dissertação.

Eu quero agradecer também o Professor Carlos Martinho pelos comentários e sugestões durante o desenvolvimento da primeira parte desta Dissertação.

Não poderia deixar de agradecer a minha esposa pelo apoio e por encorajar-me na realização de mais um sonho. Agradeço também a minha pequena filha, que nos momentos mais difíceis motivava-me sempre com a sua alegria inocente.

Por último e não menos importante, gostaria de agradecer todos os meus amigos, em especial ao Rúben Marques e ao David Moreira, pela paciência que tiveram comigo durante o curso.



## **Abstract**

Darwin defined evolution as a dynamical process based on competition and struggle for survival. In this quest, he faced a great paradox when he realized that cooperation was abundant in Nature. Since then, understanding how cooperation can evolve remains an open challenge for a broad range of disciplines, in situations where selfish individuals are encouraged or selected by evolution. In this thesis, we present a new study on the impact of pathological behaviours in the evolution and self-organization of cooperation. These individuals follow a fixed pre-defined agenda, either by defecting or by cooperating, unconditionally. To analyze their impact we resort to different social dilemmas and the tools of evolutionary game theory and network science. We incorporate social diversity using scale-free interaction networks. In these networks, most individuals have few connections, and a few have many ties (the Hubs). It is shown that when these individuals are converted into pathological altruists, only a few are needed to have a significant positive impact on the entire network, nudging the population as a whole into cooperation. Pathological altruists and defectors can be seen as humans with particular prosocial preferences, but also artificial entities designed for a specific task. In fact, we will soon face a hybrid society composed of human beings and artificial agents. In this context, it is suggested that some carefully designed entities placed in central positions in the network, would be sufficient to bring entire populations into pro-social preferences. However, the reverse will occur if these entities are pathological defectors.

**Keywords:** Complex Networks, Cooperation, Evolutionary Game Theory, Altruism, Social Dilemma



## Resumo

Darwin definiu a evolução como um processo dinâmico baseado na competição e na luta pela sobrevivência. Nesta busca, ele deparou-se com um grande paradoxo ao perceber que a cooperação era abundante na Natureza. Desde então, entender como a cooperação pode evoluir permanece um desafio aberto para uma ampla gama de disciplinas, em situações em que indivíduos egoístas são encorajados pela evolução. Nesta dissertação, apresentamos um novo estudo sobre o impacto de comportamentos patológicos na evolução da cooperação. Estes indivíduos seguem a sua própria agenda, seja desertando ou cooperando, incondicionalmente. Para analisar o seu impacto, recorreremos a diferentes dilemas sociais e às ferramentas da teoria dos jogos evolutivos e da ciência em rede. Incorporamos diversidade social ao utilizarmos interações em redes livre de escala. Neste tipo de rede, a maioria dos indivíduos tem poucas conexões e poucos indivíduos têm muitas conexões (Hubs). Mostramos que quando se converte estes indivíduos em altruístas patológicos, são necessários apenas alguns para ter um impacto positivo e significativo em toda a rede. levando a população como um todo à cooperação. Altruístas e egoístas patológicos podem ser vistos como seres humanos com preferências pró-sociais, mas também como entidades artificiais projetadas para um fim específico. De facto, em breve viveremos numa sociedade híbrida, composta por seres humanos e agentes artificiais. Neste contexto, sugere-se que algumas entidades cuidadosamente projetadas, colocadas em posições centrais na rede, seriam suficientes para levar populações inteiras a comportamentos pró-sociais. No entanto, o inverso ocorrerá se estas entidades forem desertores patológicos.

**Keywords:** Redes complexas, Cooperação, Teoria evolutiva dos jogos, Altruísmo, Dilemas Sociais





# Conteúdo

<b>Lista de Tabelas</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>3</b>
1.1 Organização do Documento . . . . .	5
<b>2 Trabalho Relacionado</b>	<b>7</b>
2.1 Mecanismos básicos que promovem a cooperação . . . . .	7
2.1.1 Seleção de parentesco . . . . .	7
2.1.2 Reciprocidade direta . . . . .	7
2.1.3 Reciprocidade indireta . . . . .	8
2.1.4 Reciprocidade na rede . . . . .	8
2.1.5 Seleção de grupo . . . . .	8
2.2 Dilemas Sociais . . . . .	9
2.2.1 Monte de Neve . . . . .	9
2.2.2 Caça ao Veado . . . . .	9
2.2.3 Dilema do Prisioneiro . . . . .	9
2.3 Teoria Evolutiva dos Jogos com $N$ pessoas . . . . .	10
2.3.1 Diversidade Social e o Jogo do Bem Público . . . . .	10
2.4 Jogo do Ultimato e Altruísmo . . . . .	11
2.5 Pró-Sociabilidade com Agentes Autónomos . . . . .	12
<b>3 Modelo</b>	<b>15</b>
3.1 Populações . . . . .	15
3.1.1 População Heterogénea . . . . .	15
3.1.2 Implementação da População . . . . .	16
3.2 Jogos e Dilemas Sociais . . . . .	16
3.3 Teoria dos Jogos Evolutivos em Grafos . . . . .	17
3.4 Simulações . . . . .	19
<b>4 Resultados e Discussão</b>	<b>21</b>
4.1 Replicação do Modelo . . . . .	21
4.2 Distribuição dos Altruístas Patológicos (APs) no Dilema do Prisioneiro . . . . .	23
4.2.1 Alcance de 60% . . . . .	24
4.2.2 Alcance de 70% . . . . .	24
4.2.3 Alcance de 80% . . . . .	26

4.3	Distribuição dos APs pelos dilemas Caça ao Veado (CV), Monte de Neve (MN) e Dilema do Prisioneiro (DP) . . . . .	27
4.3.1	Distribuição realizada pelos <i>Hubs</i> . . . . .	27
4.3.2	Distribuição realizada aleatoriamente . . . . .	27
4.4	Distribuição dos Egoístas Patológicos (EPs) em toda a população . . . . .	29
4.4.1	Distribuição realizada pelos <i>Hubs</i> . . . . .	29
4.4.2	Distribuição realizada aleatoriamente . . . . .	29
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>37</b>
5.1	Trabalho Futuro . . . . .	37
	<b>Bibliografia</b>	<b>39</b>

# Lista de Tabelas

3.1	Matriz de Pagamentos associada aos dilemas estudados: Se ambos os jogadores cooperarem (C-C), recebem uma recompensa $R$ ; Se ambos os jogadores desertarem (D-D), recebem uma punição $P$ ; Se um jogador cooperar e o outro desertar (C-D), recebem o pagamento do tolo $S$ e o pagamento da tentação $T$ respetivamente, e vice-versa. . . . .	17
3.2	Jogos estudados e os seus intervalos de parâmetros . . . . .	17
4.1	Parametrização dos valores $S$ e $T$ para o valor $\lambda$ . . . . .	23
4.2	Percentagem de altruístas patológicos distribuídos aleatoriamente que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 60% de cooperadores. O $\lambda$ representa uma combinação de valores $S$ e $T$ (ver tabela 4.1) . . . . .	24
4.3	Percentagem de altruístas patológicos distribuídos pelos <i>Hubs</i> que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 60% de cooperadores. O $\lambda$ representa uma combinação de valores $S$ e $T$ (ver tabela 4.1) . . . . .	24
4.4	Percentagem de altruístas patológicos distribuídos aleatoriamente que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 70% de cooperadores. O $\lambda$ representa uma combinação de valores $S$ e $T$ (ver tabela 4.1) . . . . .	24
4.5	Percentagem de altruístas patológicos distribuídos pelos <i>Hubs</i> que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução uma fração de 70% de cooperadores. O $\lambda$ representa uma combinação de valores $S$ e $T$ (ver tabela 4.1) . . . . .	26
4.6	Percentagem de altruístas patológicos distribuídos aleatoriamente que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 80% de cooperadores. O $\lambda$ representa uma combinação de valores $S$ e $T$ (ver tabela 4.1) . . . . .	26
4.7	Percentagem de altruístas patológicos distribuídos pelos <i>Hubs</i> que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 80% de cooperadores. O $\lambda$ representa uma combinação de valores $S$ e $T$ (ver tabela 4.1) . . . . .	27



# Lista de Figuras

2.1	<b>Estrutura populacional e vizinhanças locais.</b> O indivíduo principal (esfera maior) pertence a diferentes grupos (bairros) de diferentes tamanhos em um gráfico heterogêneo. Dado a sua conectividade $k = 4$ , foi identificado cinco bairros. A aptidão de cada indivíduo deriva da recompensa acumulada em todas as cinco vizinhanças ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ e $\epsilon$ ). Fonte: Santos, Santos, and Pacheco (2008) . . . . .	11
2.2	As linhas pretas com círculos mostram os resultados para grafos Livre de Escala (LE), enquanto as linhas cinzentas com quadrados mostram os resultados para grafos regulares. Na Figura <b>a(custo fixo por jogo)</b> cada indivíduo paga um custo $c = 1$ para cada Jogo do Bem Público (JBP) em que participa: a diversidade em número de JBPs e o tamanho de cada JBP associado ao grafo LE contribui para um aumento da cooperação. Na Figura <b>b(custo fixo por indivíduo)</b> cada indivíduo contribui com um custo total $c$ igualmente compartilhado entre todos os $k + 1$ JBPs em que um indivíduo está envolvido. Esta mudança de modelo leva à um impressionante impulso na cooperação. Fonte: Santos et al. (2008) . . . . .	12
3.1	Espaço Quadridimensional abrangido pelos dilemas: MN, CV e DP. Os três dilemas surgem de acordo com a ordem relativa destes quatro tipos de pagamentos: O jogo MN, para $T > 1 > S > 0$ ; O jogo CV, para $1 > T > 0 > S$ ; e o jogo DP, para $T > 1 > 0 > S$ . .	18
3.2	<b>Fluxograma da atualização da estratégia</b> . . . . .	18
3.3	<b>Fluxograma geral do programa</b> . . . . .	19
4.1	Distribuição de grau acumulativa ( $d(k) = k^{-y}$ e $y \approx 2$ ) para uma rede baseada no modelo Barabási-Albert com o número de nós $N = 10000$ . A distribuição foi obtida a partir de 10 redes diferentes. Os pontos representam o número de ocorrências de um grau $n$ . A cores representam as 10 diferentes redes. . . . .	22
4.2	Evolução da cooperação numa rede do tipo Escala-Livre. No lado esquerdo é apresentado o modelo original, enquanto no lado direito é mostrado o modelo desenvolvido nesta Dissertação. Ao comparar os dois modelos, é possível identificar a semelhança entre os mesmos, representando o sucesso da replicação. Estas figuras representam a percentagem de cooperadores na população no final da simulação. A cor vermelha representa 100% de cooperadores, enquanto a cor preta representa 0% de cooperadores . . . . .	22
4.3	Dilema do Prisioneiro. Cada ponto representa uma combinação de valores que categorizam uma zona dentro do dilema. Estes valores representam os tipos de pagamentos <i>Sucker's Payoff</i> e <i>Temptation</i> . . . . .	23
4.4	Evolução da cooperação. Para cada valor de $\lambda \in [0, 9]$ é mostrado a percentagem de altruístas patológicos necessários para atingir no final da dinâmica de evolução uma fração de 60% de cooperadores. Os altruístas patológicos foram distribuídos de duas formas: aleatoriamente; e pelos <i>Hubs</i> . . . . .	25

4.5	Evolução da cooperação. Para cada valor de $\lambda \in [0, 9]$ é mostrado a percentagem de altruístas patológicos necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 70% de cooperadores. Os altruístas patológicos necessários foram distribuídos de duas formas: aleatoriamente; e pelos <i>Hubs</i> . . . . .	25
4.6	Evolução da cooperação. Para cada valor de $\lambda \in [0, 9]$ é mostrado a percentagem de altruístas patológicos necessários para atingir no final da dinâmica de evolução uma fração de 80% de cooperadores. Os altruístas patológicos necessários foram distribuídos de duas formas: aleatoriamente; e pelos <i>Hubs</i> . . . . .	26
4.7	Evolução da cooperação numa população do tipo LE. Ao introduzir-se gradualmente altruístas patológicos pela população em <i>Hubs</i> , aumentou de forma muito significativa a fração de cooperadores na população. A imagem (a) representa a evolução da cooperação após a distribuição de 10% de agentes altruístas pelos <i>Hubs</i> . É possível notar o grande impacto positivo causado na evolução da cooperação. A imagem (b) representa 20%, a imagem (c) representa 30% e a imagem (d) representa 40%, onde foi possível alcançar 96% de cooperadores no final da dinâmica, o que representa um grande sucesso na evolução da cooperação. . . . .	28
4.8	Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na percentagem de APs distribuídos pelos <i>Hubs</i> . O dilema DP obteve o maior impacto, foram precisos apenas 10% de APs para que houvesse uma taxa de crescimento de 35%, e a fração de cooperadores passasse a 50% no final da dinâmica. A seguir está o dilema CV, com um taxa de crescimento de 31%, com apenas 10%. Como era de se esperar, a taxa de crescimento no dilema MN é baixa, uma vez que no modelo original, os cooperadores representavam mais de 97% da população. . . . .	29
4.9	Evolução da cooperação em uma população do tipo LE. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na percentagem de APs distribuídos aleatoriamente. Ao distribuírem-se APs de forma aleatória, notou-se que a população sofreu uma perturbação relativamente baixa, não causando um impacto significativo. Nesta configuração, o dilema do prisioneiro continua a ser o <i>Calcanhar de Aquiles</i> para a evolução dos cooperadores. A imagem (a) representa a evolução da cooperação após a distribuição de 10% de APs, e ao fazer-se a comparação com o modelo original, onde não há agentes patológicos, é possível verificar que existe uma diferença quase nula. . . . .	30
4.10	Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na percentagem de APs distribuídos aleatoriamente. Para o dilema do prisioneiro, a taxa de crescimento não ultrapassou os 23%, o que representa 40% da população final de cooperadores. Para o dilema CV, a taxa de crescimento do número de cooperadores chegou aos 17% , o que representa 82.9% dos cooperadores. Uma vez que o dilema MN representa um sucesso para os cooperadores e a distribuição é aleatória, o impacto na evolução dos cooperadores foi extremamente baixo, não ultrapassando os 3%. . . . .	31

4.11	Evolução da cooperação numa população do tipo LE. Ao introduzir-se gradualmente egoístas patológicos na população em <i>Hubs</i> , houve uma redução drástica no número de agentes cooperadores em todos os dilemas. A imagem (a) representa a evolução da cooperação com 10% de EPs, onde a fração de cooperadores foi reduzida para metade aproximadamente. A imagem (b) representa 20% e a imagem (c) 30%. A imagem (c) representa 40%, onde é possível verificar o fim trágico para os cooperadores no dilema DP, chegando a 0.1%. Os detalhes podem ser consultados no gráfico 4.12 . . . . .	32
4.12	Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na percentagem de EPs distribuídos pelos <i>Hubs</i> . Houve uma redução substancial na fração de cooperadores ao introduzir-se gradualmente EPs na população. No dilema MN e CV, esta redução aproxima-se de uma função exponencial. Para o dilema DP, foi preciso apenas 10% de EPs para os cooperadores serem quase extintos da população. O maior impacto foi no dilema MN, uma vez que na ausência de EPs, era dominado por 96.4% de cooperadores. . . . .	33
4.13	Evolução da cooperação em uma população do tipo LE após introdução gradual de egoístas patológicos na população de forma aleatória. O impacto causado em todos os dilemas não foi suficiente para representar uma ameaça à sobrevivência dos cooperadores. Na imagem (a) pode notar-se uma redução de 11% na fração dos cooperadores com 10% de EPs, na imagem (b) uma redução de 18% com 20% de EPs, na imagem (c) uma redução de 24% com 30% de EPs e na imagem (d) uma redução de 29% com 40% de EPs. Os detalhes podem ser consultados no gráfico 4.14. . . . .	34
4.14	Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na percentagem de EPs distribuídos aleatoriamente. Houve uma redução parcial na fração de cooperadores ao introduzir-se gradualmente EPs em todos os dilemas. Esta redução não se traduziu num fim trágico para a sobrevivência dos cooperadores em nenhum dos dilemas estudados. No dilema mais desafiador para os cooperadores (DP), ainda foi possível garantir que 4.1% sobrevivessem. No dilema CV, o impacto representou uma redução de 27.8% com 40% de EPs. O maior impacto foi causado no dilema MN, o que representou uma redução de 42,7% na fração dos cooperadores. . . . .	35
4.15	Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar o impacto causado na fração de cooperadores ao introduzir altruístas patológicos pela população, caracterizada pelos dilemas DP, MN e CV. A distribuição foi realizada por <i>Hubs</i> e de forma aleatória. Os resultados mostram que o impacto causado na evolução da cooperação quando a distribuição é realizada por <i>Hubs</i> é muito maior e reflete a influência que estes agentes, com um número elevado de conexões, podem causar numa população com forte heterogeneidade. . . . .	35
4.16	Evolução da cooperação. Para cada valor de $\lambda$ é apresentada a percentagem de APs necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 80% de cooperadores. Os APs necessários foram distribuídos de duas formas: aleatoriamente e pelos <i>Hubs</i> . Ao compararem-se as duas distribuições, constata-se que o número de APs necessário é sempre mais baixo quando a distribuição é realizada pelos <i>Hubs</i> , o que revela a grande influência exercida pelos <i>Hubs</i> numa população do tipo LE. . . . .	36





# Capítulo 1

## Introdução

Derivada do latim *alter* (outros), a palavra altruísmo foi introduzida pelo filósofo August Comte no século XIX. Comte acreditava que o indivíduo devia subordinar-se a uma existência fora de si para encontrar nela a fonte da sua estabilidade. Com este pensamento definiu altruísmo no contexto sociológico como: "viver para os outros" *vivre pour autrui* (Campbell, 2006).

Quantas vezes nos vimos perante situações em que tivemos de decidir entre o que é melhor para nós ou o que é melhor para um grupo ou uma sociedade como um todo? Embora as pessoas tendam a olhar primeiramente para si próprias, a cooperação acontece e desempenha um papel fundamental na evolução até os dias de hoje. Os nossos antepassados, dotados da capacidade de trabalhar em conjunto e para um bem comum foram capazes de assegurar mais alimentos, melhor proteção e cuidados infantis, melhorando assim o sucesso reprodutivo das suas populações (Pennisi E, 2005).

O emergir de comportamentos cooperadores e altruístas tem intrigado filósofos e cientistas nos últimos séculos. Quando Darwin definiu a evolução como um mecanismo baseado na competição e na luta pela existência, deparou-se com um grande paradoxo ao perceber que os animais e as pessoas formam grupos sociais em que a maioria trabalha para um bem comum. Em situações onde um indivíduo é encorajado a agir de maneira egoísta, seja por medo ou por ganância, como é que a cooperação pode desenvolver-se?

Para tentar explicar este paradoxo, Darwin recorreu a argumentos de alto nível que hoje em dia podem ser olhados como formulações incipientes dos princípios de seleção de parentesco ou seleção a vários níveis. No primeiro caso, a cooperação é mais provável em indivíduos geneticamente relacionados (*seleção de parentesco*), enquanto que, no segundo caso, a cooperação é favorecida pela competição entre grupos (*seleção de grupo*). Este tema será discutido com mais detalhe na secção 2.1.

Dezenas de espécies sociais foram estudadas nos últimos tempos, confirmando, até certo ponto, algumas das teorias de Darwin. No entanto os detalhes de como e porque a cooperação evolui permanecem em discussão (Pennisi E, 2005).

Nas últimas décadas, os cientistas têm recorrido a Teoria dos Jogos Evolutivos (TJE) para melhor compreender os fenómenos relacionados com as dinâmicas de evolução. Esta teoria foi formalizada em 1973 por John Maynard Smith e George R. Price (Smith & Price, 1973). A principal ideia presente nesta teoria é a de que grande parte dos comportamentos envolvem a interação entre muitos indivíduos de uma certa população, e o sucesso de cada indivíduo depende de uma ou mais estratégias adotadas, como por exemplo, cooperar ou não cooperar em uma determinada situação (Easley & Kleinberg, 2010). Dados um conjunto de estratégias e alguns critérios matemáticos, esta teoria pode ser usada para tentar prever qual a estratégia que prevalecerá ao fim de algumas interações.

Em TJE, o estudo da cooperação envolve tensões entre os interesses individuais e os relaciona-

dos ao bem comum de uma sociedade ou de um grupo. As tensões são descritas através de dilemas. O clássico Dilema do Prisioneiro (DP) tem sido muito utilizado como metáfora para o estudo da cooperação entre indivíduos onde a estratégia está limitada a cooperar ou desertar. Num dilema, a cooperação é definida como o ato de um indivíduo pagar um custo (não necessariamente monetário) ao outro, e em troca receber ou não algum benefício. Os detalhes deste dilema estão descritos na secção 2.2.3. A TJE quando combinada com o DP permite investigar como o comportamento cooperativo coletivo pode desenvolver-se em sociedades onde as ações egoístas, não cooperadoras, produzem um maior sucesso a curto prazo para um indivíduo.

Esta questão foi abordada em (Santos, Pacheco, & Lenaerts, 2006b), onde foi desenvolvido um modelo experimental capaz de estudar a dinâmica evolutiva da cooperação nos dilemas sociais em populações estruturadas homogêneas e heterogêneas, recorrendo à TJE e dilemas sociais. Neste contexto, indivíduos são definidos por vértices de uma rede social (ou um grafo) e as arestas definem quem interage com quem. Quando a população é homogênea, de tal forma que todos os indivíduos têm o mesmo número de conexões, a estratégia de desertar prevalece e os cooperadores têm um fim trágico, sendo completamente extintos no DP. Entretanto foram acumuladas evidências convincentes de que uma infinidade de Rede de Contatos (RdC) do mundo real biológico, social e tecnológico são na sua maioria heterogêneas, nas quais alguns indivíduos têm muito mais conexões do que outros. Ao introduzir uma forte heterogeneidade no modelo em discussão, os resultados mostraram que a cooperação foi favorecida de forma significativa.

A heterogeneidade aparenta ser um poderoso mecanismo para o desenvolvimento da cooperação. Contudo como referido no início, este sucesso pode estar relacionado com outros fatores da estrutura de uma população.

Existem indivíduos que, por várias razões, são reticentes em mudar as suas escolhas, seja por convicções religiosas, políticas, ou outras. Sabendo que Altruístas Patológicos (APs) são indivíduos predestinados a cooperarem sempre não se deixando induzir pelas tentações da ganância ou pelo medo, principais fatores que podem levar à não-cooperação, estará o sucesso da evolução humana relacionado de alguma forma com este conceito.

Qual será o impacto de introduzir indivíduos APs no modelo acima referido? Em particular, qual será o impacto se os APs tiverem uma alta influência na população, ou seja, um elevado número de conexões? Por outro lado, estes comportamentos patológicos podem também aparecer na sua forma maliciosa, onde Egoístas Patológicos (EPs) podem ser utilizados para destruir a cooperação.

Esta Dissertação abordará esta questão analisando o emergir da cooperação com base nos três dilemas mais populares e extensamente estudados em dinâmicas evolutivas, os detalhes estão na secção 2.2.

Será mostrado que ao introduzir-se APs com uma alta influência na população, o emergir dos cooperadores é favorecido de forma muito significativa, representando um impulso importante para o seu desenvolvimento.

Os resultados aqui apresentados podem ajudar no estudo de um novo campo da Computação Pró-social, visando compreender, prever e promover a pró-socialidade entre os seres humanos, através de agentes artificiais e sistemas multiagentes.

Se pensarmos que num futuro próximo viveremos em uma sociedade híbrida onde seres humanos e agentes artificiais irão conviver uns com os outros, podemos pensar na seguinte pergunta: Quais são as condições e mecanismos que levam as sociedades de agentes e humanos a serem mais pró-sociais? Além de promover o altruísmo nos seres humanos, se tivermos a capacidade de desenvolver agentes artificiais que sejam APs, podemos estar no caminho certo, onde os comportamentos pró-sociais possam surgir em maiores escalas.

## 1.1 Organização do Documento

No capítulo 2 é apresentado algum trabalho prévio. Na primeira parte, são introduzidos os mecanismos básicos que promovem a cooperação conhecidos como *Cinco regras para a evolução da cooperação*. Na segunda parte, são descritos os três dilemas sociais utilizados como metáfora para estudar as tensões que levam a um indivíduo a cooperar ou não cooperar. Na terceira parte, são introduzidos dois jogos evolutivos, onde a evolução dos comportamentos cooperadores é analisada, recorrendo a TJE, nomeadamente, o Jogo do Bem Público e o Jogo do Ultimato.

No capítulo 3, é explicado como o modelo utilizado para estudar o impacto de indivíduos APs em populações heterogêneas foi implementado. O modelo é dividido em 4 módulos: Um onde é apresentado como a população foi representada e implementada; outro cuja função é descrever a implementação dos Dilemas Sociais; outro que explica como a evolução da cooperação é obtida recorrendo-se a dinâmicas replicadoras; o último que descreve a configuração utilizada nas simulações.

O capítulo 4 apresenta os resultados experimentais e a discussão. A primeira parte é composta pela replicação do modelo desenvolvido em (Santos, Pacheco, & Lenaerts, 2006a). Na segunda parte, são apresentados os resultados após distribuir APs em zonas específicas da população, representada pelo dilema do prisioneiro. Na terceira parte é apresentado o impacto na evolução da cooperação após distribuir os APs por toda a população e pelos três dilemas propostos: Dilema do Prisioneiro; Caça ao Veado e Monte de Neve. Na quarta parte também será apresentado o impacto na evolução dos cooperadores, mas distribuindo EPs ao invés de APs.

No capítulo 5 é descrita a conclusão.



## Capítulo 2

# Trabalho Relacionado

A cooperação apresenta um papel fundamental na história da evolução ajudando à criação de diferentes níveis de organização. Desde microrganismos, como as células, ou pessoas que vivem em sociedades, têm nas suas bases comportamentos cooperadores. (Nowak, 2006).

Se a teoria da seleção natural propõe uma grande e exaustiva competição entre os replicadores envolvidos, como é que a cooperação consegue sobreviver neste meio hostil? Como exemplo, pode pensar-se no caso das ações coletivas humanas, como proteger ou caçar. Sem a cooperação mútua entre os indivíduos envolvidos, estas tarefas do dia a dia poderiam tornar-se facilmente num fardo pesado, colocando em causa a sobrevivência da própria humanidade.

O estudo da evolução da cooperação tem sido um desafio fundamental e extraordinário para cientistas de diversas áreas, inclusive para a ciência da computação.

### 2.1 Mecanismos básicos que promovem a cooperação

Começa-se por se definirem, de forma distinta, alguns mecanismos básicos conhecidos como *As cinco regras para a evolução da cooperação*, estando todos correlacionados entre si.

#### 2.1.1 Seleção de parentesco

Kin Selection baseia-se na parentalidade genética entre diferentes organismos, ou seja, se partilham o mesmo gene. Segundo a regra de Hamilton (Hamilton, 1964), a cooperação existirá se o coeficiente do parentesco genético  $r$  for maior que o custo-benefício do ato ( $r > c/b$ ), onde  $c$  define o custo do indivíduo que realizou o ato e  $b$  o benefício adquirido pelo beneficiário do ato altruísta.

#### 2.1.2 Reciprocidade direta

Trivers sugeriu o seguinte mecanismo: Se houver encontros repetitivos entre dois indivíduos onde cada um pode escolher cooperar ou não, a cooperação mútua pode ser favorecida. Isto porque se um dos indivíduos tomar a atitude de cooperar num exato momento, o outro pode cooperar no futuro (Trivers, 1971).

A reciprocidade direta pode levar à evolução da cooperação se  $w > c/b$ , onde  $w$  é a probabilidade de um novo encontro entre os indivíduos.

“A base das relações sociais é a reciprocidade: se você cooperar com os outros, os outros irão cooperar com você” (Carroll Quigley)

### 2.1.3 Reciprocidade indireta

Existem aspetos importantes para os humanos que não são cobertos pelo mecanismo da reciprocidade direta. Muitas vezes as interações são assimétricas e a probabilidade de um novo encontro é pequena.

Ajudar pessoas estabelece uma boa reputação, o que pode ser bem visto aos olhos da sociedade. A reputação é o motor que está por detrás da reciprocidade indireta. Uma abordagem possível para este mecanismo, poderia ser o fato de duas pessoas serem escolhidas aleatoriamente e decidirem se querem ou não cooperar uma com a outra, por sua vez, esta interação é observada por um conjunto de pessoas que podem informar outras pessoas conectadas à rede sobre o que aconteceu.

Estudos teóricos e empíricos demonstraram que pessoas que ajudam com maior frequência têm uma maior probabilidade de serem ajudadas (Nowak, 2006). A memória e a linguagem humana exercem um papel fundamental para que a reciprocidade indireta tenha sucesso.

Este mecanismo apenas promove a cooperação se a probabilidade  $q$ , de conhecer a reputação de uma pessoa excede o custo benefício do ato altruísta  $q > c/b$ .

### 2.1.4 Reciprocidade na rede

As populações conhecidas como “bem-misturadas” onde todos os indivíduos interagem igualmente entre si, serviram durante muitos anos como padrão para o estudo das dinâmicas evolutivas (Hofbauer & Sigmund, 1998). Entretanto, em populações reais, como a que se vive hoje em dia, encontra-se uma estrutura diferente, no sentido de que alguns indivíduos têm muito mais contatos que outros, o que resulta num número diferente de interações. Este tipo de população é considerada heterogénea.

Para estudar melhor este tipo de estrutura, recorre-se à teoria evolutiva dos grafos. As pessoas de uma certa população são os vértices do grafo e as arestas determinam quem interage com quem. Analogamente, pode dizer-se que as arestas associadas a um vértice define a sua vizinhança.

Pode pensar-se na seguinte configuração: um grafo onde um vértice adota uma de duas estratégias, cooperar ou não-cooperar. Cooperadores pagam um custo  $c$  para obter um benefício  $b$ . Não cooperadores não têm custos e os seus vizinhos não recebem nenhum benefício (Nowak, 2006). Nesta configuração os cooperadores podem prevalecer formando grupos onde ajudam um ao outro acumulando elevados benefícios.

Através de simulações computacionais, os jogos em grafos têm contribuído significativamente para o estudo das dinâmicas evolutivas em populações heterogéneas. Para haver favorecimento da cooperação, o benefício custo,  $b/c$ , precisa de ser maior que  $k$  (número médio de vizinhos na rede).

No artigo (Santos et al., 2006a), “*Evolutionary dynamics of social dilemmas in structured heterogeneous populations*” foi desenvolvido um modelo baseado na Teoria dos Jogos Evolutivos (TJE) e em Dilemas Sociais onde é estudado a evolução da cooperação em populações heterogéneas. As simulações demonstraram que a reciprocidade na rede representa um poderoso mecanismo para o desenvolvimento da cooperação.

### 2.1.5 Seleção de grupo

Na sociedade atual facilmente se encontram pessoas divididas por um certo grupo de interesses. O grupo de leitores, o grupo de provedores de vinho, etc. Dentro de cada grupo pode encontrar-se pessoas que cooperam ou não.

Desta ideia pode pensar-se no seguinte modelo: os indivíduos reproduzem-se proporcionalmente ao seu pagamento acumulado. Quanto mais cooperarem, mais rápido se reproduzem. Se o grupo atingir um certo tamanho, é dividido em dois.

A seleção natural emerge em dois níveis: no primeiro nível há competição entre grupos. Alguns crescem mais rápido do que outros e assim se dividem mais frequentemente, favorecendo a cooperação; no segundo nível existe competitividade dentro do grupo e, na ausência de qualquer mecanismo adicional, chega-se ao caso trivial onde a não-cooperação prevalece.

Com base neste modelo a evolução da cooperação é promovida se o benefício custo,  $b/c$ , for maior que  $1 + (n/m)$ , onde  $n$  é o número máximo do tamanho do grupo e  $m$  é o número de grupos (Nowak, 2006).

## 2.2 Dilemas Sociais

Como referido anteriormente, a teoria evolutiva dos jogos, quando aplicada a dilemas sociais, tem contribuído para melhor compreender toda a complexidade que está subjacente à evolução da cooperação e seus efeitos.

Os dilemas podem ser descritos através de tensões que levam o indivíduo a pensar em si próprio ou para o bem comum. Esta tensão está diretamente relacionada com dois fatores, o medo e a ganância.

Entre os principais dilemas temos:

### 2.2.1 Monte de Neve

Uma pessoa vai a conduzir tranquilamente pela estrada no inverno e de repente um grande bloco de neve cai e bloqueia a estrada. Uma vez que as pessoas desta aldeia são muito ocupadas e, sozinhas, demorariam imenso tempo a limpar a estrada, a tentação para não sair do carro é muito grande. Entretanto, mais cedo ou mais tarde a estrada terá de ser limpa. Ainda assim, se sair do carro dificilmente terá ajuda porque os indivíduos desta aldeia são considerados egoístas.

Cooperação mútua não seria a estratégia mais racional aqui, mas sim esperar e ver o que o outro escolhe. No pior caso, todos esperam e não há progresso.

### 2.2.2 Caça ao Veado

Jean-Jacques Rousseau em *Discurso sobre a Origem e os Fundamentos da Desigualdade entre os Homens* descreveu a seguinte situação: duas pessoas saem para caçar, cada um pode caçar um veado ou uma lebre. Cada caçador tem de escolher uma ação sem saber a escolha do outro. A tensão acontece porque se um escolher caçar o veado, irá precisar da ajuda do outro para obter sucesso. Para caçar a lebre não é preciso ajuda, mas não tem tanta quantidade de carne como o veado (Skyrms, 2004).

A não cooperação mútua emerge como sendo a estratégia mais favorável. O medo por não saber se o outro irá cooperar ou não, exerce nos caçadores o desejo de arriscar pelo seguro, caçando a lebre e não se ajudando mutuamente, pois “Mais vale um pássaro na mão do que dois a voar”

### 2.2.3 Dilema do Prisioneiro

Primeiramente enquadrado por Merrill Flood e Melvin Dresher em 1950, o dilema do prisioneiro foi apenas formalizado em 1992 por Albert W. Tucker e descreve a seguinte situação (Kollock, 1998):

dois membros de um grupo de malfeitores são presos. Cada preso está confinado sozinho e não há maneira de comunicarem um com o outro. O promotor não tem evidência suficiente para condenar o par à acusação principal, portanto os prisioneiros esperam apanhar um ano de prisão por uma acusação inferior. No entanto, o promotor oferece a cada prisioneiro um acordo: a oportunidade de traição,

confessando que o outro cometeu o crime ou permanecer em silêncio. Se ambos os prisioneiros *A* e *B* cometerem traição, apanharão 2 anos de prisão cada. Se *A* trair e *B* permanecer em silêncio, *A* sairá em liberdade e *B* apanhará 3 anos de prisão (e vice-versa). Em último caso, se *A* e *B* permanecerem em silêncio, ambos ficarão presos por 1 ano.

Neste dilema, ambas as tensões mencionadas no jogo Monte de Neve (MN) e Caça ao Veado (CV) estão presentes e a decisão mais racional passa por ambos se traírem mutuamente, mesmo que a melhor opção seja permanecer em silêncio.

Esta decisão racional pode ser explicada pelo seguinte argumento: Se *A* cooperar (permanecer em silêncio), *B* deveria não cooperar porque é sempre melhor ir em liberdade do que permanecer um ano na prisão. Por outro lado, se *A* não cooperar, *B* deveria não cooperar porque servir dois anos é melhor do que três.

Este dilema e os dois mencionados anteriormente serão discutidos formalmente na seção 3.2.

## 2.3 Teoria Evolutiva dos Jogos com $N$ pessoas

Muitas vezes, dilemas associados à cooperação envolvem muitos indivíduos que agem de modo simultâneo. Um dos jogos mais famosos que descreve este tipo de situação é conhecido como o Jogo do Bem Público (JBP), muito utilizado em economia experimental (Andreoni, 1988).

No JBP os jogadores que cooperam decidem secretamente quanto querem contribuir para um bem público. Os não cooperadores não contribuem. Após todos contribuírem, o montante é multiplicado por um fator maior que 1 e menor que o número de jogadores. No final o montante é dividido igualmente por todos os jogadores.

Os grupos de cooperadores têm maior sucesso que os grupos de não cooperadores, mas o objetivo racional passa por cada jogador tentar maximizar o seu próprio pagamento, podendo levá-lo a não contribuir ou a contribuir com uma quantia muito baixa.

Fazendo uma analogia com o mundo real poderia pensar-se no Acordo de Paris, onde é apresentado um plano de ações destinado a limitar o aquecimento global para minimizar os impactos causados pelas alterações climáticas. Todos os países se beneficiariam de uma redução do nível de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), mas hesitam profundamente em cumprir qualquer acordo (cooperação-mútua). Políticas conflituosas entre países ricos e pobres, incertezas quanto aos objetivos a atingir e a falta de instituições credíveis para monitorizar e sancionar aqueles que não cumprem os acordos, estão entre as principais causas para não haver cooperação (Paluck, Shepherd, & Aronow, 2016).

### 2.3.1 Diversidade Social e o Jogo do Bem Público

A TJE aplicada ao JBP prevê uma alta tentação para os indivíduos não cooperarem podendo levá-los a absterem-se da contribuição. Entretanto ao analisar o que acontece na vida real, nota-se que o ser humano geralmente coopera (Kollock, 1998).

Um estudo realizado em 2008 pela revista *Nature* (Santos et al., 2008) concluiu que a diversidade social promove a cooperação no JBP, abrindo novos caminhos para compreender melhor quais os mecanismos envolvidos na evolução da cooperação.

A diversidade social é apresentada através de grafos heterogêneos. A cooperação é promovida pela diversidade associada ao número e tamanho do JBP em que cada indivíduo participa, ver Figura 2.1.

A Figura 2.2(a) mostra os resultados empíricos obtidos através de simulações para a evolução da cooperação onde existe um custo fixo para todos os indivíduos a contribuir por jogo. O gráfico mostra a



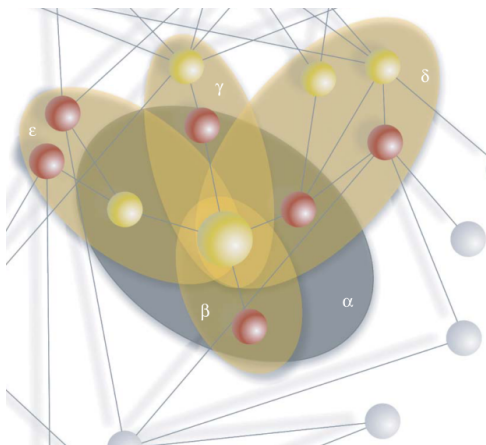


Figura 2.1: **Estrutura populacional e vizinhanças locais.** O indivíduo principal (esfera maior) pertence a diferentes grupos (bairros) de diferentes tamanhos em um gráfico heterogêneo. Dado a sua conectividade  $k = 4$ , foi identificado cinco bairros. A aptidão de cada indivíduo deriva da recompensa acumulada em todas as cinco vizinhanças ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  e  $\epsilon$ ). Fonte: Santos et al. (2008)

fração de cooperadores na população que sobreviveram à evolução em função do fator renormalizado  $n = r/(z + 1)$ , onde  $z$  é a conectividade média da população no grafo.

A comparação é realizada entre grafos regulares, onde todos os indivíduos têm o mesmo número de vizinhos (na perspectiva da estrutura de uma população), com grafos fortemente heterogêneos, revelando assim o impacto obtido pela heterogeneidade. Enquanto em grafos regulares (homogêneos) a população de cooperadores tornou-se predominante (a sua fração ultrapassou os 50%) com  $n = 0.7$ , em grafos do tipo Livre de Escala (LE) (heterogêneos)  $n$  diminuiu para 0.6.

Já a Figura 2.2b mostra um grande impulso na evolução da cooperação quando o custo fixo é por indivíduo e proporcional a  $k + 1$ , onde  $k$  é o número de vizinhos. Neste caso os cooperadores tornaram-se predominantes para valores de  $n$  abaixo de 0.4.

Uma das propriedades mais importante dos grafos fortemente heterogêneos é a existência de *Hubs*, isto é, nós altamente conectados. Consoante ao modelo de contribuição (contribuição proporcional ao número de vizinhos), o pagamento relativo de um único cooperador aumenta com a sua conectividade. Como consequência, a heterogeneidade confere uma vantagem natural aos *Hubs*.

Os não cooperadores são vítimas do seu próprio sucesso, gerando não cooperadores à sua volta. Como consequência diminuem, o valor dos seus Pagamentos Acumulados Recebidos (PAR) ao longo do tempo, uma vez que não contribuem. Assim, mesmo que seja um *Hub* torna-se vulnerável quanto à existência de um cooperador com um valor alto de PAR que esteja a sua volta.

Em comunidades que estão sobre a influência de normas sociais, a contribuição pode ser vista como cooperação. Nesse contexto, os resultados sugerem a possibilidade de comunidades bem-sucedidas serem aquelas em que o ato de dar é mais importante que o valor dado.

É importante salientar que o estudo não teve em consideração mecanismos baseados em recompensa ou punição, tão presentes na sociedade.

## 2.4 Jogo do Ultimato e Altruísmo

Um cenário comum dentro de grandes corporações é a distribuição de diferentes recompensas associadas a empreendimentos cooperativos.

Até que ponto as pessoas estão dispostas a tolerar uma distribuição que acham injusta resultante de uma desigualdade? Afim de tentar esclarecer este tipo de cenário e não só, o chamado Jogo do

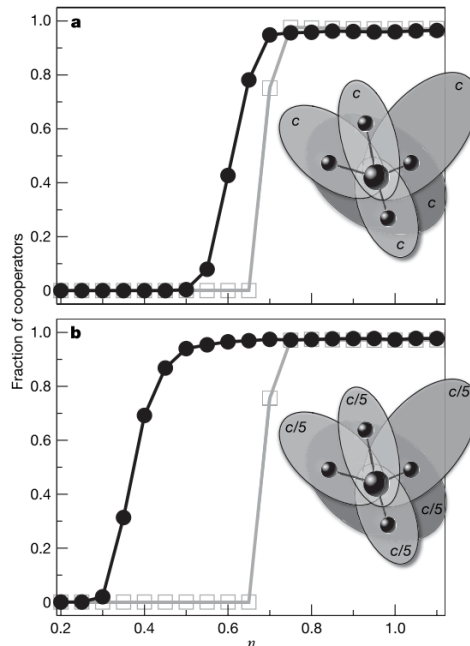


Figura 2.2: As linhas pretas com círculos mostram os resultados para grafos LE, enquanto as linhas cinzentas com quadrados mostram os resultados para grafos regulares. Na Figura **a**(custo fixo por jogo) cada indivíduo paga um custo  $c = 1$  para cada JBP em que participa: a diversidade em número de JBPs e o tamanho de cada JBP associado ao grafo LE contribui para um aumento da cooperação. Na Figura **b**(custo fixo por indivíduo) cada indivíduo contribui com um custo total  $c$  igualmente compartilhado entre todos os  $k + 1$  JBPs em que um indivíduo está envolvido. Esta mudança de modelo leva à um impressionante impulso na cooperação. Fonte: Santos et al. (2008)

Ultimato (JU) tem atraído estudiosos e economistas.

O jogo foi introduzido por Guth et al. (1982), e numa primeira abordagem consiste na interação entre dois jogadores. O jogador 1, chamado de proponente, recebe uma quantia (por exemplo, em dinheiro), e tem que partilhar com o jogador 2, conhecido como respondedor, que pode aceitar ou rejeitar a partilha.

O aspeto intrigante do jogo está no facto de que se o respondedor rejeitar, ambos os jogadores não recebem qualquer quantia do dinheiro.

A solução racional para o proponente é oferecer sempre a menor quantia possível e esperar que o respondedor a aceite, pois é sempre melhor receber uma pequena quantia do que nenhuma. Com efeito, os humanos em divergência, normalmente preferem divisões justas.

Vários estudos realizados em diferentes países mostraram que a maioria dos proponentes ofereceram uma partilha justa. Entre 60% – 80% ofereceram frações entre 0.4 a 0.5 da quantia total, e apenas 3% ofereceram partilhas abaixo de 0.2. Por volta de 50% dos respondedores rejeitaram as propostas abaixo de um terço da quantia total (Page, Nowak, & Sigmund, 2000).

## 2.5 Pró-Sociabilidade com Agentes Autónomos

Um novo tipo de sociedade está a emergir, onde humanos e agentes autónomos irão coexistir. Nesta sociedade híbrida, podem os agentes autónomos serem utilizados para promover comportamentos pró-sociais? Tais comportamentos podem ser vistos como voluntários e destinados a beneficiar o próximo. O ato, considerado altruísta, deve ocorrer sem expectativas de recompensas materiais ou sociais para o benfeitor (EISENBERG, 1982). Uma vez que a cooperação desempenha um papel fundamental na sociedade e está diretamente ligada aos comportamentos pró-sociais, surge uma nova área chamada

*Computação pró-social*, que visa compreender, prever e promover a sociabilidade entre os seres humanos, através de agentes artificiais e sistemas multi-agentes (Paiva, Santos, & Santos, 2018).

Ao olhar mais profundamente para a computação pró-social, facilmente surgem várias questões, como: A cooperação humana-agente depende dos mesmos mecanismos que sustentam a cooperação em sociedades humanas? Os agentes influenciadores podem ser usados para promover a cooperação em situações onde os comportamentos egoístas são os únicos esperados? Para um humano, um ato altruísta de um agente terá a mesma influência? Para abordar estas questões, e não só, são propostos vários estudos (Paiva et al., 2018):

1. Compreender o surgimento do comportamento pró-social em populações usando simulação em larga escala de sistemas multi-agentes;
2. Realizar estudos experimentais com humanos e agentes usando dilemas sociais para entender as condições e situações em que surgem comportamentos pró-sociais;
3. Projetar comportamentos específicos, como os altruístas, nos cenários iniciais da simulação social para estudar os efeitos nas populações;
4. realizar estudos com humanos e agentes virtuais em Mundos virtuais. Os agentes podem ser construídos como pró-sociais (dados resultados anteriores), desencadeando um comportamento pró-social;
5. Projetar Robôs Sociais como agentes pró-sociais para testá-los em espaços físicos naturais, onde os seres humanos e agentes coexistem;

O ponto 3 é abordado nesta Tese. Através de simulações computacionais recorrendo a Teoria Evolutiva dos Jogos, Dilemas sociais e Teoria dos Grafos, será estudado o impacto de comportamentos patológicos na evolução da cooperação.



## Capítulo 3

# Modelo

Neste capítulo é apresentado o modelo da solução proposta. O modelo é baseado em dinâmicas evolutivas de dilemas sociais em populações heterogêneas estruturadas. O estudo do impacto de agentes Altruístas Patológicos (APs) na evolução da cooperação consiste em aplicar a Teoria dos Jogos Evolutivos (TJE) aos dilemas sociais mais populares e estudados: (i) Dilema do Prisioneiro (DP), (ii) Caça ao Veado (CV) e (iii) Monte de Neve (MN), como descrito detalhadamente na secção 2.2. Seguidamente é descrito em maior detalhe o modelo, que tem como base o modelo desenvolvido em (Santos et al., 2006a).

O modelo é dividido em 4 módulos: um módulo onde é apresentado como a população heterogênea foi representada e implementada; um módulo a descrever a implementação dos Dilemas Sociais; um módulo a explicar como a evolução da cooperação é obtida recorrendo a dinâmicas replicadoras; um módulo a descrever a configuração utilizada nas simulações.

### 3.1 Populações

Uma população é definida por um conjunto de agentes diretamente conectados, e é representada por um grafo. Cada indivíduo é composto pelos seguintes atributos: grau; pagamento acumulado; estratégia; estado.

O grau representa o número de conexões que um indivíduo tem com os outros indivíduos da população. Após a interação entre dois agentes, cada um recebe um pagamento e o seu valor varia, consoante exista cooperação ou não entre os dois agentes. Estes valores serão descritos em mais detalhes na secção 3.2. A estratégia pode tomar dois valores, cooperar ou desertar. Desertar é definido como o ato de não cooperar. A cada indivíduo também é atribuída uma postura, caso seja um altruísta patológico, egoísta patológico ou não apresente tais comportamentos. Após um indivíduo interagir com todas as suas conexões, pode mudar de estratégia. Um altruísta, sendo cooperador patológico nunca mudará a sua estratégia. O mesmo acontece com o egoísta, que é desertor. A Rede de Contatos (RdC) social em que se vive, na qual alguns agentes têm mais contatos do que outros, é claramente heterogênea (Albert & Barabasi, 2002). Neste estudo são utilizadas redes com um forte grau de heterogeneidade para torná-lo o mais real possível.

#### 3.1.1 População Heterogênea

Os grafos heterogêneos correspondem a populações nas quais diferentes agentes exibem padrões distintos de conectividade, apresentando a coexistência de conexões locais (bairros) e não-locais. A rede de contatos existente na sociedade tem um grau de heterogeneidade elevado. Quando uma rede

heterogénea exibe uma distribuição de grau que segue uma lei de potências do tipo  $d(k) \approx k^{-\gamma}$  em que  $\gamma \approx 2$ , está-se perante redes do tipo redes livre de escala ( *scale-free networks*) (Barabási & Albert, 1999). Neste tipo de rede emergem os conhecidos Pontos Centrais, agentes com um número elevado de conexões que interagem com uma grande fração da população.

### 3.1.2 Implementação da População

Para implementar este tipo de rede recorreu-se à teoria dos grafos e ao algoritmo Barabási-Albert. Este algoritmo é baseado em duas características: crescimento e ligação preferencial.

A cada passo de tempo  $t$ , o algoritmo produz um grafo com  $n = t + m_0$  vértices e  $mt$  arestas. Os novos vértices ligam-se aos vértices já existentes com uma probabilidade proporcional ao seu grau. Analogamente uma RdC social, os vértices de um grafo representam os agentes, e as ligações, as suas conexões diretas.

O programa recebe como entrada o número máximo de vértices, ou seja, o número de agentes da população. A parte crítica do programa é garantir a característica das ligações preferenciais, fundamental para o surgimento de redes do tipo Livre de Escala (LE). A parte do crescimento é garantida cada vez que é introduzido um novo indivíduo na rede.

O pseudo-código é apresentado a seguir:

---

#### Algorithm 1 Ligação Preferencial

---

```

1: procedure LP ▷
2:    $grauAcumulado \leftarrow$  ▷ soma do grau de todos os agentes da população até o momento
3:    $numero \leftarrow$  ▷ número aleatório gerado entre 0 e grauAcumulado
4:    $i \leftarrow 0$ 
5:   while  $numero > 0$  do
6:      $numero \leftarrow numero - individuo[i].grau$ 
7:      $i \leftarrow i + 1$ 
8:   end while return  $individuo[i]$  ▷ Jogador escolhido
9: end procedure

```

---

## 3.2 Jogos e Dilemas Sociais

A interação entre os agentes é modelada em termos de jogos com duas pessoas, onde os jogadores podem adotar a estratégia de cooperar ou desertar ao interagir uns com os outros.

Se ambos os jogadores cooperarem (cooperação mútua) recebem uma recompensa  $R$  (sem perda de generalidade,  $R = 1$ ). Deserção mútua leva à punição  $P$  ( $P = 0$ , normalizando a vantagem da cooperação mútua sobre a deserção mútua para 1 em todos os jogos). Outras duas possibilidades podem ocorrer quando um jogador coopera e o outro deserta. Se o jogador  $A$  cooperar e o jogador  $B$  desertar, então  $A$  receberá  $S$  (*Suckers'Payoff* ( $SP$ )) e  $B$  receberá  $T$  (*Temptation* ( $T$ )), ver a tabela 3.1.

Os três dilemas surgem naturalmente de acordo com a ordem relativa destes quatro tipos de pagamentos: O jogo MN, para  $T > 1 > S > 0$ ; O jogo CV, para  $1 > T > 0 > S$ ; e o jogo DP, para  $T > 1 > 0 > S$ .

A tensão torna-se aparente quando as escolhas preferidas de cada jogador levam a ações individuais egoístas resultando em deserção mútua ou unilateral, apesar do facto de a cooperação mútua ser mais benéfica. Concretizando, a tensão surgirá quando os jogadores preferirem a deserção unilateral à cooperação mútua ( $T > 1$ ). Quando os jogadores preferirem a deserção mútua à cooperação unilateral ( $S < 0$ ), ou quando ambas as situações surgirem, que é precisamente o que acontece no dilema MN,

		jogador 1	
		C	D
jogador 2	C	R	S
	D	T	P

Tabela 3.1: Matriz de Pagamentos associada aos dilemas estudados: Se ambos os jogadores cooperarem (C-C), recebem uma recompensa  $R$ ; Se ambos os jogadores desertarem (D-D), recebem uma punição  $P$ ; Se um jogador cooperar e o outro desertar (C-D), recebem o pagamento do tolo  $S$  e o pagamento da tentação  $T$  respetivamente, e vice-versa.

Tabela 3.2: Jogos estudados e os seus intervalos de parâmetros

Jogo	Abreviação	Parâmetros	Tensão incluída em cada dilema
Monte de Neve	MN	$T > 1 > S > 0$	Jogadores preferem deserção unilateral à cooperação mútua
Caça ao Veado	CV	$1 > T > 0 > S$	Jogadores preferem deserção mútua à cooperação unilateral
Dilema do Prisioneiro	DP	$T > 1 > 0 > S$	Ambas as tensões acima estão incorporadas neste dilema

CV e no DP, respetivamente. Formalmente, estes dilemas abrangem um espaço quadridimensional, ver Figura 3.1. Após normalizar a cooperação mútua ( $R = 1$ ) e a deserção mútua ( $P = 0$ ), fica-se com dois parâmetros,  $T$  e  $S$ . É estudado o comportamento em todos os dilemas, resumidos na tabela 3.2, tendo em consideração os seguintes intervalos  $0 \leq T \leq 2$  e  $-1 \leq S \leq 1$ , suficientes para caracterizar o jogo em estudo.

### 3.3 Teoria dos Jogos Evolutivos em Grafos

Para todos os valores de ( $R = 1, P = 0, 0 \leq T \leq 2$  e  $-1 \leq S \leq 1$ ), a evolução é obtida através de dinâmicas replicadoras em populações finitas.  $S$  e  $T$  são definidos em intervalos de 0.1 dentro dos seus limites, assim sendo  $S \in [1, 0.9, 0.8, \dots, -1]$  e  $T \in [0, 0.1, 0.2, \dots, 2]$ .

A dinâmica é obtida pela seguinte transição de probabilidade: em cada ciclo de vida (uma geração), todos os pares de agentes diretamente conetados  $a$  e  $b$  jogam entre si numa única volta guardando os seus pagamentos acumulados  $P_a$  e  $P_b$ . No final de cada geração, as estratégias (cooperar ou desertar) são atualizadas simultaneamente. Quando  $a$  está a ser atualizado, escolhe de forma aleatória um dos seus vizinhos  $x$ . Se  $P_x > P_a$ , então  $a$  passa a escolher a estratégia de  $x$  com a probabilidade dada por:  $(P_x - P_a) / [X * Y]$ , onde  $X = \max(K_a, K_x)$  e  $Y = ((\max(T, 1) - \min(S, 0)))$ .  $K_a$  e  $K_x$  representam o número de conexões (grau) de  $a$  e  $x$  respetivamente. Este denominador assegura uma normalização apropriada da probabilidade de transição. A figura 3.2 apresenta o fluxograma da atualização de estratégia.

Quanto maior a diferença entre os seus pagamentos acumulados, maior a probabilidade de transição da estratégia. Esta regra de atualização tipicamente modela a evolução cultural, na qual os agentes tendem a imitar as estratégias daqueles que têm um melhor desempenho. No fluxograma 3.3 é possível obter uma visão geral do modelo.

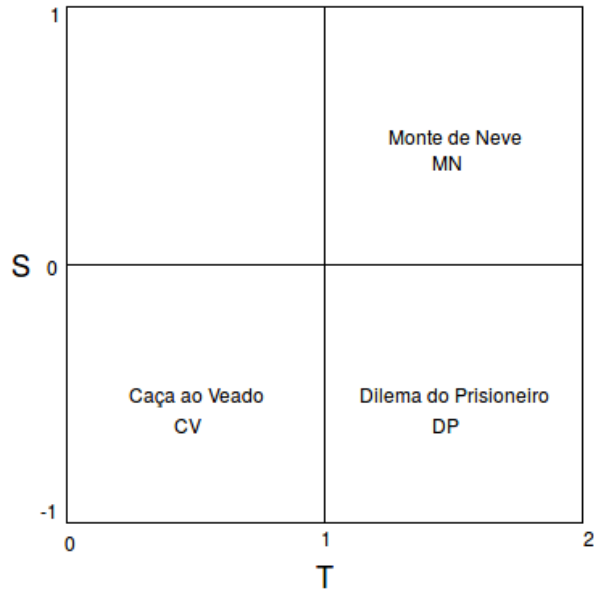


Figura 3.1: Espaço Quadridimensional abrangido pelos dilemas: MN, CV e DP. Os três dilemas surgem de acordo com a ordem relativa destes quatro tipos de pagamentos: O jogo MN, para  $T > 1 > S > 0$ ; O jogo CV, para  $1 > T > 0 > S$ ; e o jogo DP, para  $T > 1 > 0 > S$ .

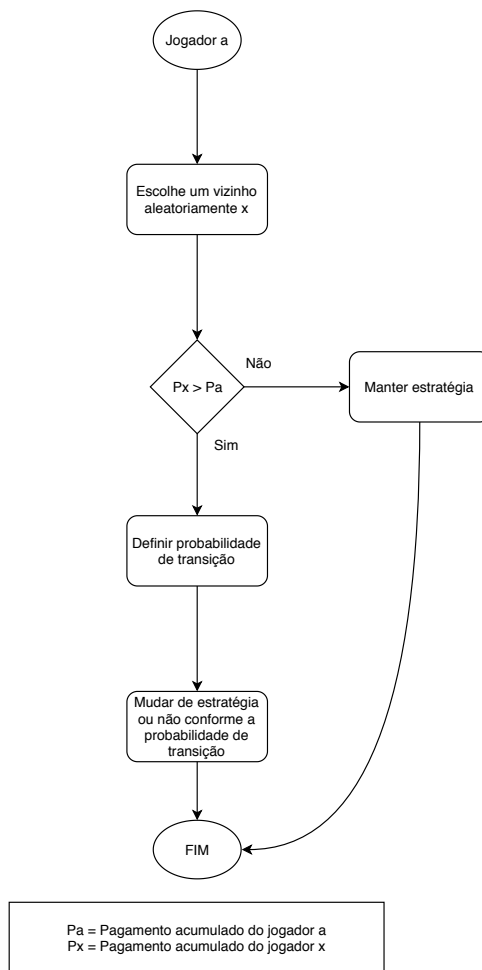


Figura 3.2: Fluxograma da atualização da estratégia



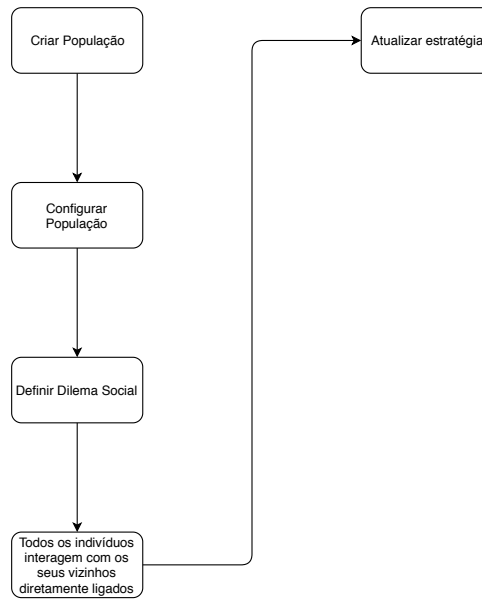


Figura 3.3: Fluxograma geral do programa

### 3.4 Simulações

As simulações foram realizadas em grafos com  $N = 10^4$  vértices e um grau médio de conectividade  $Z = 4$  para grafos heterogêneos e  $Z = (N - 1)$  para grafos homogêneos. Para cada combinação de valores  $S$  e  $T$  foram realizadas 100 simulações, que correspondem a 10 corridas para cada um dos 10 grafos diferentes. Numa corrida são obtidas as frequências do número de cooperadores e desertores realizando uma média correspondente a 1.000 gerações, depois de um tempo transitório de 10.000 gerações.

As simulações começam com uma percentagem igual de estratégias (cooperadores e desertores) distribuídos aleatoriamente pelos elementos da população. Assim, todos os vértices são inicialmente configurados com uma estratégia, e não é dada nenhuma vantagem inicial aos cooperadores ou desertores.

A topologia do gráfico permanece congelada ao longo da evolução, ou seja, não são adicionados ou removidos vértices, e as suas conexões permanecem inalteradas.



## Capítulo 4

# Resultados e Discussão

O principal objetivo deste capítulo é apresentar o impacto causado na dinâmica da evolução dos co-operadores após serem distribuídos pela população agentes Altruístas Patológicos (APs) e Egoístas Patológicos (EPs). A distribuição é realizada de forma aleatória ou a partir dos nós com um alto número de conexões (*Hubs*). A população é representada pelos dilemas: Monte de Neve, Caça ao Veado e Dilema do prisioneiro.

Este capítulo está dividido em quatro partes: uma parte onde será apresentada a comparação do modelo original e a sua replicação desenvolvida nesta dissertação; uma outra parte onde é estudado o comportamento na evolução da cooperação após introduzir APs Em alguns pontos específicos da população que representa o dilema do prisioneiro; uma parte onde é mostrado o impacto na evolução da cooperação após distribuírem-se APs de forma aleatória e direcionada pelos *Hubs*; um módulo onde são apresentados os mesmos resultados que os mencionados anteriormente, substituindo a distribuição de APs por EPs.

### 4.1 Replicação do Modelo

Para avaliar a replicação do modelo, começou por analisar-se a distribuição de grau das redes geradas que representam a população. Foi necessário garantir que as redes são do tipo Livre de Escala (LE) utilizadas no modelo original. Estas redes foram desenvolvidas através do algoritmo Barabási-Albert.

O gráfico 4.1 mostra-nos a distribuição de grau obtida das 10 redes utilizadas nas simulações. O gráfico exhibe uma lei de potências tal que  $d(k) = k^{-y}$  e  $y \approx 2$ . Diante destes resultados, pode afirmar-se que se trabalha com redes do género LE dotada de uma forte heterogeneidade (Barabási & Albert, 1999). Ao analisar o gráfico, pode verificar-se que muitos nós têm um grau de conectividade muito baixo. Por outro lado, existe uma quantidade pequena de nós com um grau de conectividade muito alto.

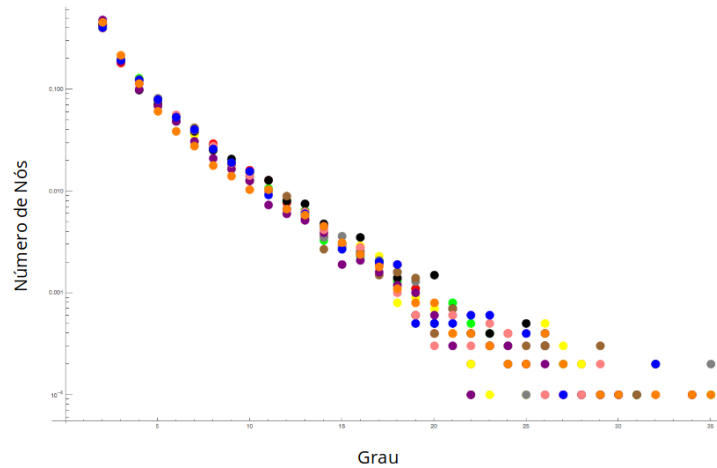


Figura 4.1: Distribuição de grau acumulativa ( $d(k) = k^{-y}$  e  $y \approx 2$ ) para uma rede baseada no modelo Barabási-Albert com o número de nós  $N = 10000$ . A distribuição foi obtida a partir de 10 redes diferentes. Os pontos representam o número de ocorrências de um grau  $n$ . As cores representam as 10 diferentes redes.

A seguir aplicou-se a dinâmica evolutiva às redes (ver 3.3), obtendo-se o valor estacionário relativo ao número de cooperadores e não cooperadores replicados ao fim da simulação (ver 3.4). Este valor foi obtido para cada combinação dos parâmetros  $S \in [-1, 1]$  e  $T \in [0, 2]$ , utilizados para caracterizar os três dilemas: Monte de Neve; Caça ao Veado e o Dilema do Prisioneiro. A imagem 4.2 mostra os resultados obtidos no modelo original e os resultados obtidos no modelo desenvolvido nesta Tese. Ao analisarem-se as duas imagens, podemos concluir que a replicação do modelo foi obtida com sucesso.

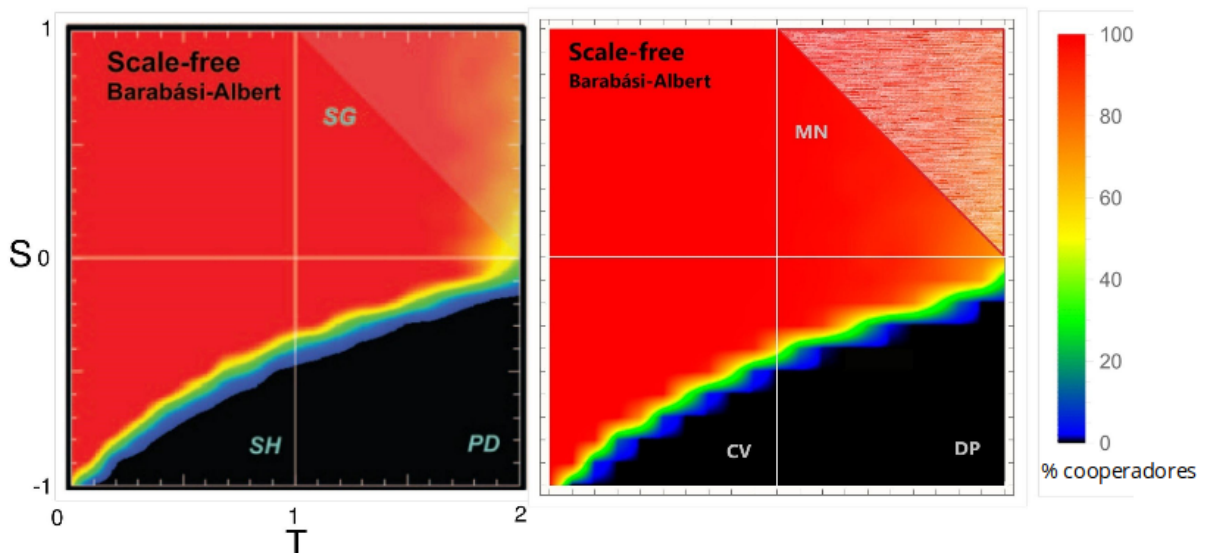


Figura 4.2: Evolução da cooperação numa rede do tipo Escala-Livre. No lado esquerdo é apresentado o modelo original, enquanto no lado direito é mostrado o modelo desenvolvido nesta Dissertação. Ao comparar os dois modelos, é possível identificar a semelhança entre os mesmos, representando o sucesso da replicação. Estas figuras representam a percentagem de cooperadores na população no final da simulação. A cor vermelha representa 100% de cooperadores, enquanto a cor preta representa 0% de cooperadores

$S$	$T$	$lambda$
-0.1	1.1	1
-0.2	1.2	2
-0.3	1.3	3
-0.4	1.4	4
-0.5	1.5	5
-0.6	1.6	6
-0.7	1.7	7
-0.8	1.8	8
-0.9	1.9	9

Tabela 4.1: Parametrização dos valores  $S$  e  $T$  para o valor  $lambda$

## 4.2 Distribuição dos APs no Dilema do Prisioneiro

Para poder analisar o impacto na população ao introduzir APs, decidi primeiramente estudar-se uma pequena amostra do Dilema do Prisioneiro (DP), antes de aplicar a dinâmica para toda a população, que inclui também o Monte de Neve (MN) e o Caça ao Veado (CV). O objetivo inicial era perceber o impacto na evolução dos cooperadores, ao distribuir gradualmente APs em pontos específicos da população.

A distribuição dos APs foi realizada de duas formas, aleatoriamente ou a partir de *Hubs*. A distribuição por *Hubs* foi feita após criar uma classificação pelo número de contactos. Desta classificação foram escolhidos os que tem mais contactos. Será possível reverter o cenário trágico para os cooperadores em algumas zonas da população, onde chegaram a ser extintos na simulação realizada no modelo original ?

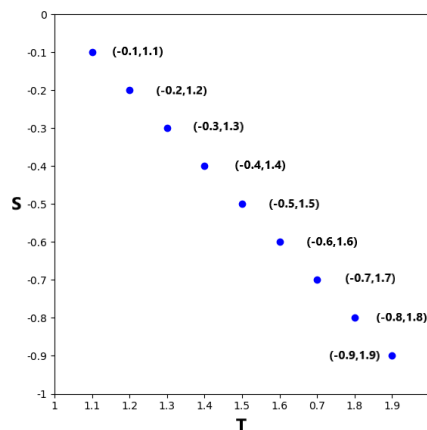


Figura 4.3: Dilema do Prisioneiro. Cada ponto representa uma combinação de valores que categorizam uma zona dentro do dilema. Estes valores representam os tipos de pagamentos *Sucker's Payoff* e *Temptation*

Os valores dos parâmetros que caracterizam o dilema do prisioneiro variam entre  $1 < T < 2$  e  $0 < S < -1$ . Antes de aplicar a dinâmica para todas as combinações de valores (ver 4.3), estudou-se uma combinação de valores  $S$  e  $T$  pré-definidos, ao qual se deu o nome de  $lambda$ . Para facilitar a apresentação dos resultados, os valores de  $S$  e  $T$  foram parametrizados para um respetivo  $lambda$ , como consta na tabela 4.1

Os valores escolhidos percorrem a diagonal do dilema, (ver a imagem 4.3). Quanto menor for o valor de  $S$  e maior o valor de  $T$ , menor é a probabilidade de sobrevivência para os cooperadores. Neste caso,

está-se perante zonas da população onde o “medo” e a “ganância” representados pelos parâmetros  $S$  e  $T$  são elevados.

Uma vez definidos os  $lambdas$ , tentou perceber-se que percentagem de APs seria preciso distribuir pela população para alcançar no final da dinâmica 60%, 70% e 80% de cooperadores. No modelo original a fração de cooperadores foi 0% para os valores de  $S \in [-0.7, -0.8, \dots -1]$  e  $T \in [1.3, 1.4, \dots, 2]$ . É importante lembrar que para os valores de  $S \in [0, -0.1, -0.2]$  e  $T \in [1, 1.1, 1.2]$  não foi preciso distribuir APs, uma vez que já satisfaz a condição estudada. Para estes valores o número de cooperadores já é de 100%. Assim sendo, nos resultados seguintes estes valores não serão referenciados.

#### 4.2.1 Alcance de 60%

Começou por mostrar-se os resultados obtidos para o alcance de 60%. Foi possível alcançar 60% de cooperadores para todas as combinações de  $lambda$ , tanto na distribuição realizada de forma aleatória como por *Hubs*. Para a distribuição aleatória, o número necessário de APs foi sempre muito alto, representando uma taxa de esforço elevada. Os valores são os seguintes:

lambda	3	4	5	6	7	8	9
% Aps	3%	34%	60%	74%	90%	97%	100.0%

Tabela 4.2: Percentagem de altruístas patológicos distribuídos aleatoriamente que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 60% de cooperadores. O  $lambda$  representa uma combinação de valores  $S$  e  $T$  (ver tabela 4.1)

Na distribuição realizada pelos *Hubs*, o número de APs necessários baixou de forma muito significativa, ver o gráfico 4.4. Para o  $lambda$  igual a 5, foram precisos apenas 5% de APs, o que representa uma diferença de 55% se comparar com a distribuição aleatória. Os valores são:

lambda	3	4	5	6	7	8	9
% Aps	0.05%	1%	5%	13%	21%	29%	36%

Tabela 4.3: Percentagem de altruístas patológicos distribuídos pelos *Hubs* que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 60% de cooperadores. O  $lambda$  representa uma combinação de valores  $S$  e  $T$  (ver tabela 4.1)

O número de APs precisos é sempre mais baixo quando a distribuição é realizada pelos *Hubs*, o que revela o alto poder de influência que os *Hubs* exercem numa população do tipo LE.

#### 4.2.2 Alcance de 70%

Ao passar para 70%, o número de APs necessários aumentou para ambas as distribuições, quando comparado com o alcance de 60%. Na distribuição aleatória, não foi possível alcançar 70% para os valores de  $lambda \in [8, 9]$ , sendo que para o  $lambda$  igual a 7, foi preciso que 100% dos cooperadores fossem altruístas patológicos, ver tabela 4.4.

lambda	3	4	5	6	7	8	9
% Aps	3.5%	40%	70%	90%	100%	–	–

Tabela 4.4: Percentagem de altruístas patológicos distribuídos aleatoriamente que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 70% de cooperadores. O  $lambda$  representa uma combinação de valores  $S$  e  $T$  (ver tabela 4.1)

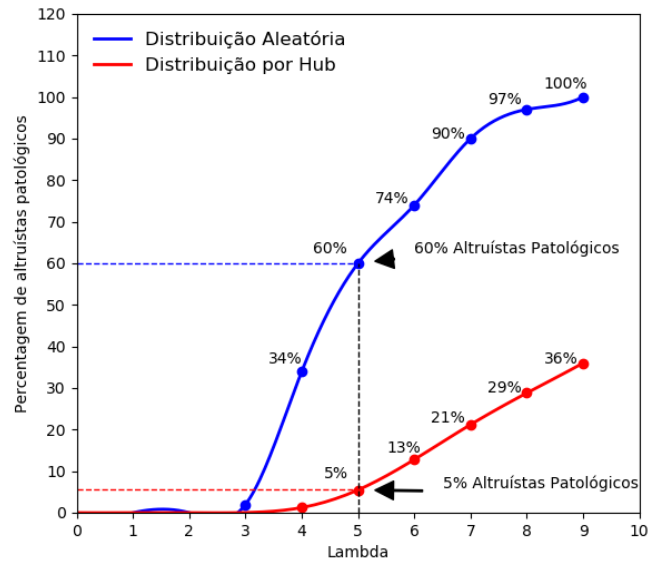


Figura 4.4: Evolução da cooperação. Para cada valor de  $\lambda \in [0, 9]$  é mostrado a porcentagem de altruístas patológicos necessários para atingir no final da dinâmica de evolução uma fração de 60% de cooperadores. Os altruístas patológicos foram distribuídos de duas formas: aleatoriamente; e pelos *Hubs*

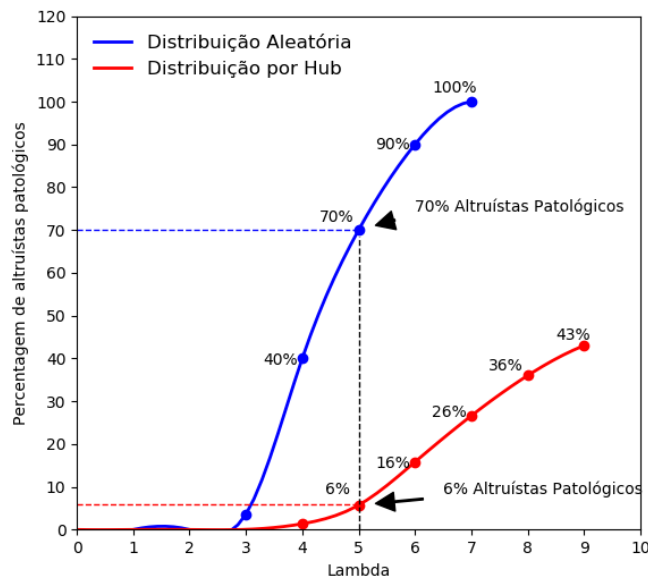


Figura 4.5: Evolução da cooperação. Para cada valor de  $\lambda \in [0, 9]$  é mostrado a porcentagem de altruístas patológicos necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 70% de cooperadores. Os altruístas patológicos necessários foram distribuídos de duas formas: aleatoriamente; e pelos *Hubs*.

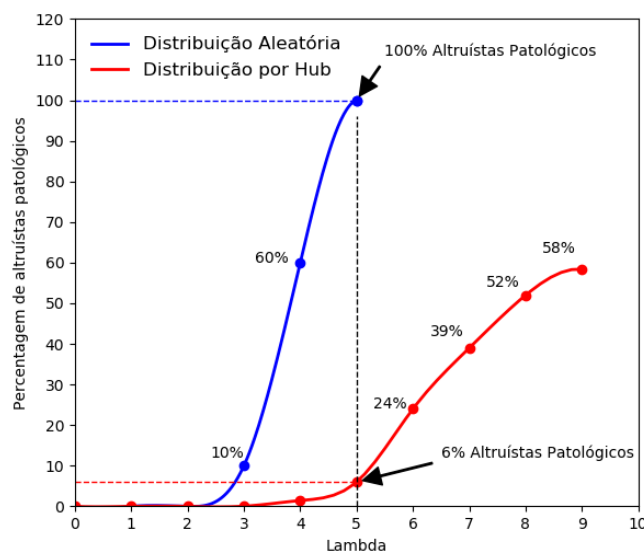


Figura 4.6: Evolução da cooperação. Para cada valor de  $\lambda \in [0, 9]$  é mostrado a porcentagem de altruístas patológicos necessários para atingir no final da dinâmica de evolução uma fração de 80% de cooperadores. Os altruístas patológicos necessários foram distribuídos de duas formas: aleatoriamente; e pelos *Hubs*.

Para a distribuição realizada pelos *Hubs*, foram obtidos valores para todos os  $\lambda$ s, o que representa um sucesso, ao comparar-se com a distribuição aleatória ver o gráfico 4.5. O número de APs manteve-se baixo:

lambda	3	4	5	6	7	8	9
% Aps	0.4%	1.36%	5.72%	15.8%	26.6%	36	43

Tabela 4.5: Percentagem de altruístas patológicos distribuídos pelos *Hubs* que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução uma fração de 70% de cooperadores. O  $\lambda$  representa uma combinação de valores  $S$  e  $T$  (ver tabela 4.1)

### 4.2.3 Alcance de 80%

O alcance de 80% representa o maior desafio. O esforço foi evidente, e foram precisos ainda mais APs. Para a distribuição aleatória, o maior valor de  $\lambda$  alcançado foi 5, e foi preciso o número máximo de APs (100%), ver gráfico 4.6. Os valores detalhados são os seguintes:

lambda	3	4	5	6	7	8	9
% Aps	10%	60%	100%	-	-	-	-

Tabela 4.6: Percentagem de altruístas patológicos distribuídos aleatoriamente que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 80% de cooperadores. O  $\lambda$  representa uma combinação de valores  $S$  e  $T$  (ver tabela 4.1)



lambda	3	4	5	6	7	8	9
% Aps	0.8%	2%	6%	24	36	45	58

Tabela 4.7: Percentagem de altruístas patológicos distribuídos pelos *Hubs* que são necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 80% de cooperadores. O *lambda* representa uma combinação de valores *S* e *T* (ver tabela 4.1)

O cenário muda completamente quando a distribuição é feita pelos *Hubs*. O efeito messiânico causado pelos APs distribuídos pelos *Hubs* fez com que os cooperadores se multiplicassem por toda a população, mesmo em zonas (*lambda* igual a 9) onde o medo de ser enganado e a ganância por obter resultados a curto prazo estão bem presentes. Estes resultados mostram-nos a alta influência que os *Hubs* exercem numa população do tipo LE. Pode analisar-se o *lambda* igual a 5 para o alcance de 80%, onde foram precisos 100% de APs distribuídos aleatoriamente, e apenas 6% de APs distribuídos pelos *Hubs*, representando uma diferença de 94%.

### 4.3 Distribuição dos APs pelos dilemas CV, MN e DP

Nesta secção será mostrado o impacto causado pelos APs na evolução da cooperação em toda a população, caracterizada pelos três dilemas em estudo: Monte de Neve; Caça ao Veado; e Dilema do Prisioneiro. Os APs serão distribuídos de forma aleatória e pelos *Hubs*.

#### 4.3.1 Distribuição realizada pelos *Hubs*

A influência que os nós, com um número elevado de conexões, têm na população é sem dúvida relevante e, ao distribuímos os APs pelos *Hubs*, foi possível notar, claramente, o aumento na fração de cooperadores (ver a imagem 4.7). O maior impacto foi visível no Dilema do Prisioneiro, que representava o maior desafio para a sobrevivência dos cooperadores. Ao distribuírem-se os agentes patológicos, gradualmente, de 10 em 10%, foi possível estudar a taxa de crescimento da fração de cooperadores ao longo do tempo. No Dilema do Prisioneiro foram necessários apenas 10% de APs para se obter uma taxa de crescimento de 36%, ver o gráfico 4.8. Para converter 96% da população em agentes cooperadores, foi necessário distribuir 40% de agentes patológicos. Por outras palavras, foi possível reverter o fim trágico dos cooperadores no modelo original.

#### 4.3.2 Distribuição realizada aleatoriamente

Após serem distribuídos APs de forma aleatória, obteve-se um impacto quase marginal, quando comparado com a distribuição por *Hubs* (ver a imagem 4.9). Foram precisos 40% de APs para que houvesse algum impacto, embora pequeno na fração de cooperadores. Para o dilema DP, os agentes não-cooperadores ainda representam uma grande parte da população. O gráfico 4.10 mostra o crescimento da fração de cooperadores por cada dilema, e pode notar-se um crescimento não linear ao números de APs distribuídos, o que neste caso representa um baixo impacto na população.

O impacto causado na fração dos cooperadores ao efetuar uma distribuição aleatória de APs é pouco relevante quando comparada com a distribuição realizada por *Hubs*. Após distribuir 10% de APs por *Hubs*, observa-se um aumento de 22.4% na fração de cooperadores ao fazer uma média por todos os dilemas. Para a mesma percentagem de APs distribuídos de forma aleatória, foi obtido um aumento de apenas 3% (ver o gráfico 4.15). Esta diferença representa 19.4% de cooperadores a mais, refletindo o efeito messiânico que os *Hubs* causam em todos os dilemas. Para alcançar uma fração

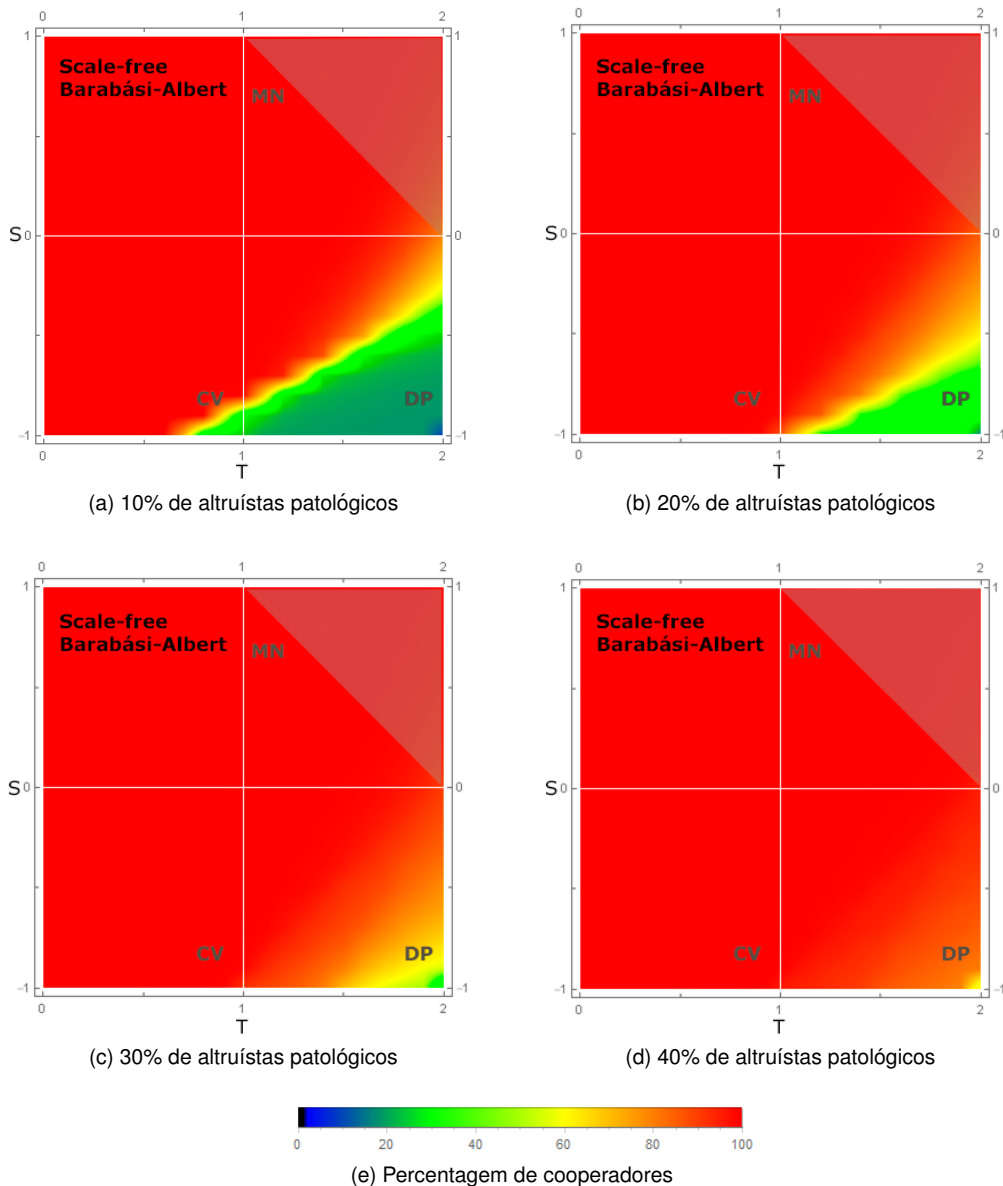


Figura 4.7: Evolução da cooperação numa população do tipo LE. Ao introduzir-se gradualmente altruístas patológicos pela população em *Hubs*, aumentou de forma muito significativa a fração de cooperadores na população. A imagem (a) representa a evolução da cooperação após a distribuição de 10% de agentes altruístas pelos *Hubs*. É possível notar o grande impacto positivo causado na evolução da cooperação. A imagem (b) representa 20%, a imagem (c) representa 30% e a imagem (d) representa 40%, onde foi possível alcançar 96% de cooperadores no final da dinâmica, o que representa um grande sucesso na evolução da cooperação.

acima dos 94%, foram necessários 30% de APs por *Hubs*. Após a distribuição de forma aleatória do mesmo número de APs, a fração não ultrapassou os 70%.

Ao analisar o dilema do prisioneiro especificamente, que representa o maior desafio para a evolução da cooperação, pode verificar-se que bastaram apenas 10% de APs distribuídos por *Hubs* para os cooperadores reverterem o jogo, passando a ser a maioria com 53%.

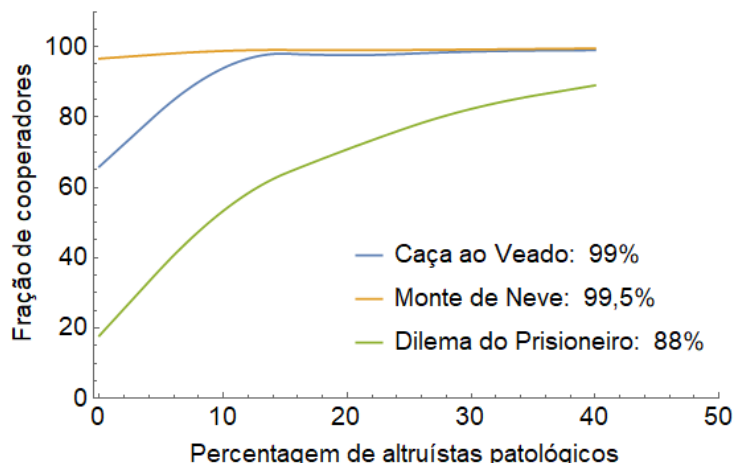


Figura 4.8: Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na porcentagem de APs distribuídos pelos *Hubs*. O dilema DP obteve o maior impacto, foram precisos apenas 10% de APs para que houvesse uma taxa de crescimento de 35%, e a fração de cooperadores passasse a 50% no final da dinâmica. A seguir está o dilema CV, com um taxa de crescimento de 31%, com apenas 10%. Como era de se esperar, a taxa de crescimento no dilema MN é baixa, uma vez que no modelo original, os cooperadores representavam mais de 97% da população.

## 4.4 Distribuição dos EPs em toda a população

Neste caso, o cenário reverte-se, e será mostrado o impacto causado pelos EPs na evolução da cooperação em toda a população, caracterizada pelos três dilemas em estudo: Monte de Neve; Caça ao Veado; Dilema do Prisioneiro. Os EPs são distribuídos de forma aleatória e por *Hubs*, como no módulo anterior.

### 4.4.1 Distribuição realizada pelos *Hubs*

Ao distribuírem-se EPs pelos *Hubs* notou-se uma redução drástica no número de agentes cooperadores em todos os dilemas (ver a imagem 4.11). No dilema MN, onde a cooperação existia em abundância, bastaram apenas 10% de EPs para reduzir a fração de cooperadores para metade (ver o gráfico 4.12). Ao passar a porcentagem de EPs para 40%, a fração de cooperadores foi reduzida a 9.8%. Para o dilema DP o fim foi trágico, e também foram precisos apenas 10% de EPs para reduzir a fração de cooperadores a 0.1%. A conclusão não foi muito diferente para o dilema CV e a fração foi reduzida a 21.5% e 6.8% com 10% e 40% de EPs, respectivamente.

### 4.4.2 Distribuição realizada aleatoriamente

O impacto causado em todos os dilemas foi pouco significativo e a manutenção da fração dos cooperadores na população foi mantida com sucesso (ver a imagem 4.13). No dilema DP houve uma redução de 14.4% na fração dos cooperadores com 40% de EPs. Com isso, foi possível garantir a sobrevivência dos cooperadores no dilema mais desafiante (ver o gráfico 4.14). No dilema CV, a redução é de 7.8% com 10% EPs, passando a 27.8% com 40%. A maior impacto foi verificado no dilema MN, uma vez que os cooperadores representam quase toda a população quando não há agentes patológicos. Este impacto representou uma redução de 16.9% com 10% de EPs e 47,7% com 40%.

Ao analisar a fração de cooperadores após obter uma média sobre todos os dilemas, é possível obter uma visão geral da diferença entre a distribuição realizada por *Hubs* e a distribuição realizada de

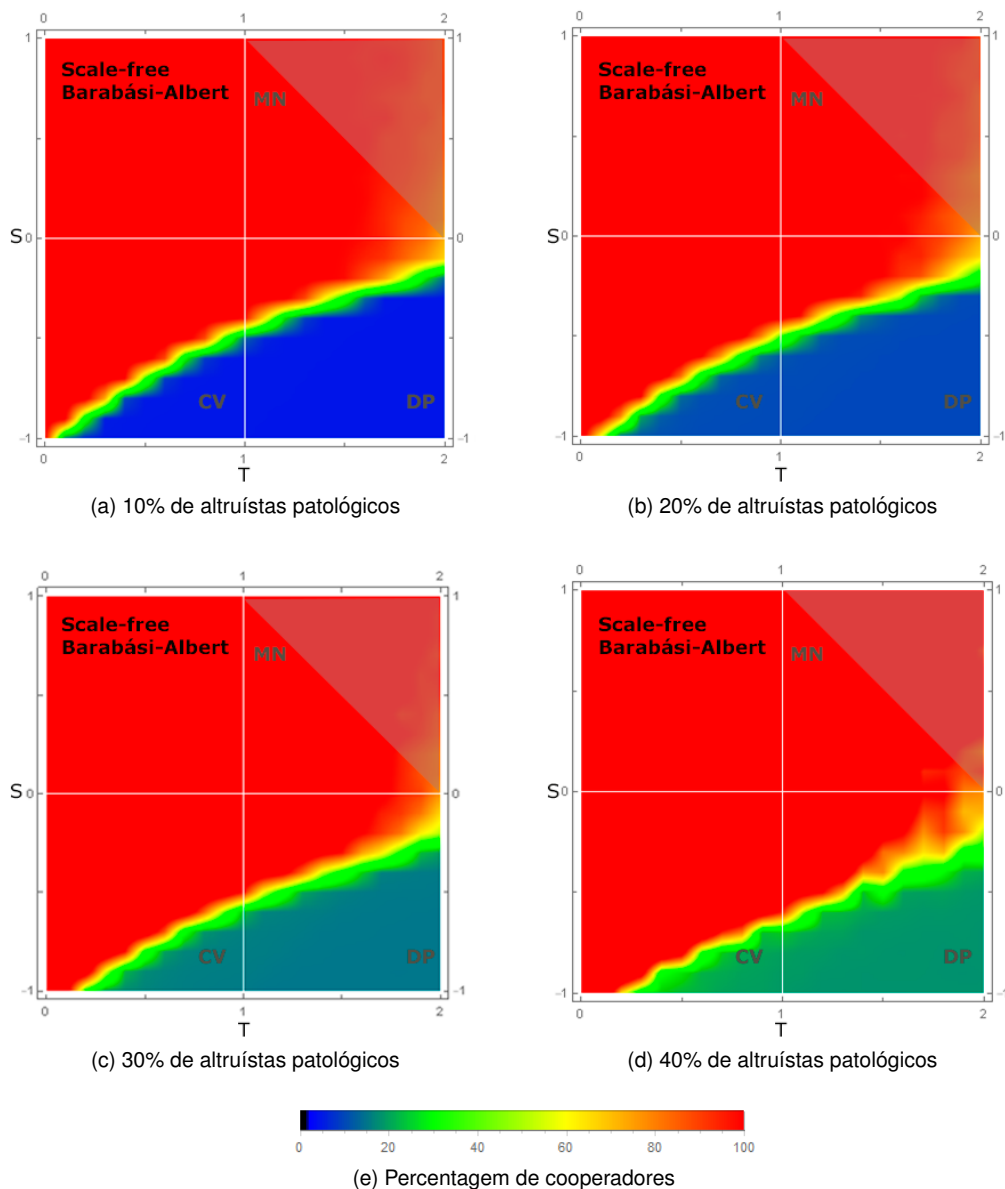


Figura 4.9: Evolução da cooperação em uma população do tipo LE. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na percentagem de APs distribuídos aleatoriamente. Ao distribuírem-se APs de forma aleatória, notou-se que a população sofreu uma perturbação relativamente baixa, não causando um impacto significativo. Nesta configuração, o dilema do prisioneiro continua a ser o *Calcanhar de Aquiles* para a evolução dos cooperadores. A imagem (a) representa a evolução da cooperação após a distribuição de 10% de APs, e ao fazer-se a comparação com o modelo original, onde não há agentes patológicos, é possível verificar que existe uma diferença quase nula.

forma aleatória. Com apenas 10% de EPs por *Hubs*, a fração de cooperadores foi reduzida a 19%, o que representa uma queda de 43.1% (ver o gráfico 4.16). Com o mesmo número de EPs, mas agora distribuídos aleatoriamente, a fração de cooperadores passou a 51%, representado uma queda de apenas 11%. Com o valor máximo de EPs, isto é, 40% por *Hubs*, a fração de cooperadores é quase extinta da população passando a apenas 6.8%, enquanto que em modo aleatório ainda representaria um terço da população.

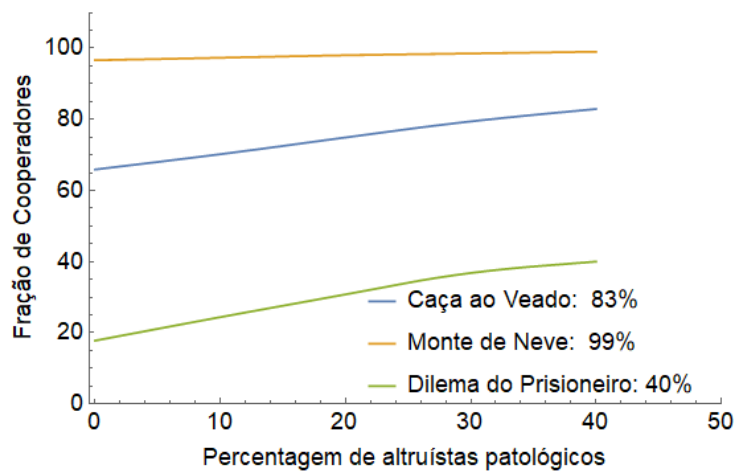


Figura 4.10: Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na porcentagem de APs distribuídos aleatoriamente. Para o dilema do prisioneiro, a taxa de crescimento não ultrapassou os 23%, o que representa 40% da população final de cooperadores. Para o dilema CV, a taxa de crescimento do número de cooperadores chegou aos 17% , o que representa 82.9% dos cooperadores. Uma vez que o dilema MN representa um sucesso para os cooperadores e a distribuição é aleatória, o impacto na evolução dos cooperadores foi extremamente baixo, não ultrapassando os 3%.

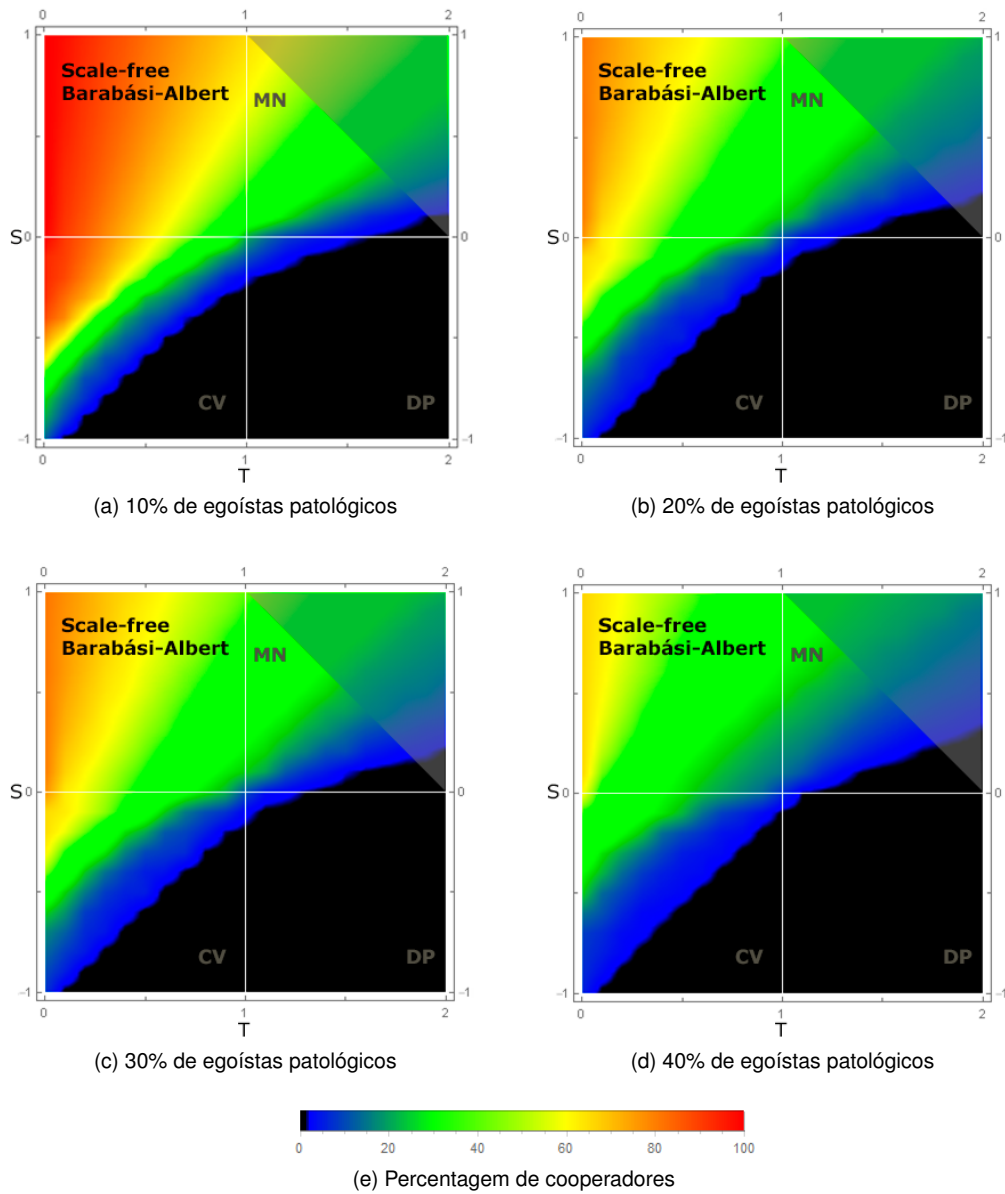


Figura 4.11: Evolução da cooperação numa população do tipo LE. Ao introduzir-se gradualmente egoístas patológicos na população em *Hubs*, houve uma redução drástica no número de agentes cooperadores em todos os dilemas. A imagem (a) representa a evolução da cooperação com 10% de EPs, onde a fração de cooperadores foi reduzida para metade aproximadamente. A imagem (b) representa 20% e a imagem (c) 30%. A imagem (d) representa 40%, onde é possível verificar o fim trágico para os cooperadores no dilema DP, chegando a 0.1%. Os detalhes podem ser consultados no gráfico 4.12

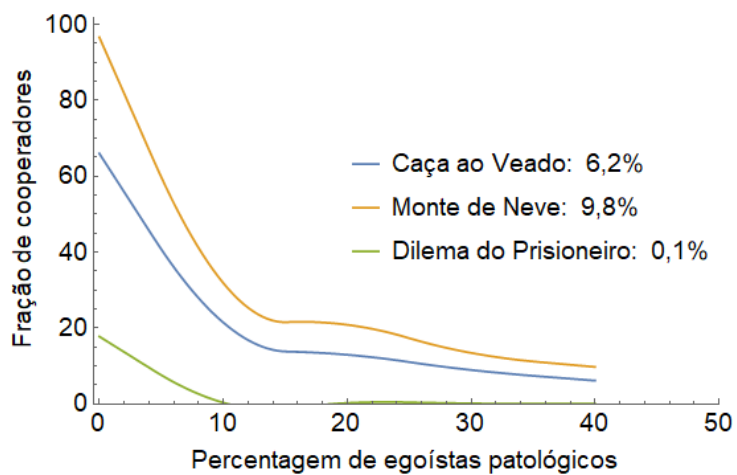


Figura 4.12: Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na percentagem de EPs distribuídos pelos *Hubs*. Houve uma redução substancial na fração de cooperadores ao introduzir-se gradualmente EPs na população. No dilema MN e CV, esta redução aproxima-se de uma função exponencial. Para o dilema DP, foi preciso apenas 10% de EPs para os cooperadores serem quase extintos da população. O maior impacto foi no dilema MN, uma vez que na ausência de EPs, era dominado por 96.4% de cooperadores.

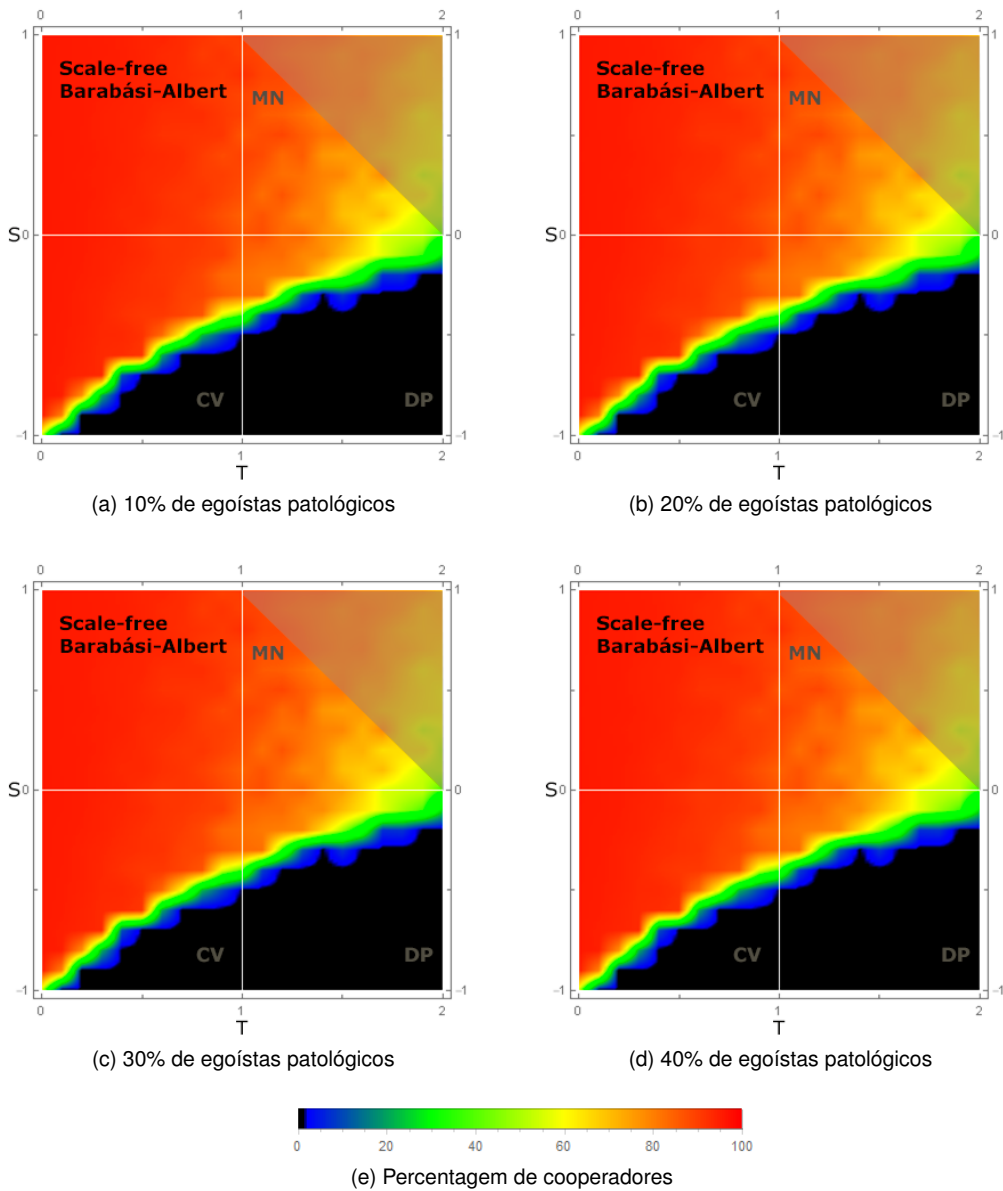


Figura 4.13: Evolução da cooperação em uma população do tipo LE após introdução gradual de egoístas patológicos na população de forma aleatória. O impacto causado em todos os dilemas não foi suficiente para representar uma ameaça à sobrevivência dos cooperadores. Na imagem (a) pode notar-se uma redução de 11% na fração dos cooperadores com 10% de EPs, na imagem (b) uma redução de 18% com 20% de EPs, na imagem (c) uma redução de 24% com 30% de EPs e na imagem (d) uma redução de 29% com 40% de EPs. Os detalhes podem ser consultados no gráfico 4.14.



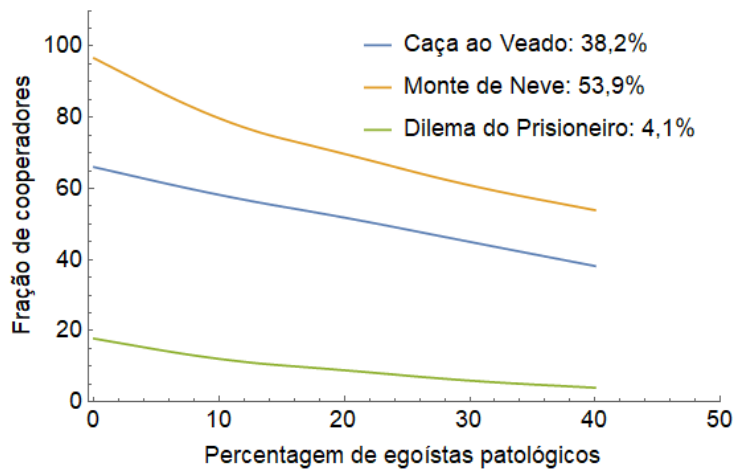


Figura 4.14: Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar a evolução do número de cooperadores por dilema social com base na porcentagem de EPs distribuídos aleatoriamente. Houve uma redução parcial na fração de cooperadores ao introduzir-se gradualmente EPs em todos os dilemas. Esta redução não se traduziu num fim trágico para a sobrevivência dos cooperadores em nenhum dos dilemas estudados. No dilema mais desafiador para os cooperadores (DP), ainda foi possível garantir que 4.1% sobrevivessem. No dilema CV, o impacto representou uma redução de 27.8% com 40% de EPs. O maior impacto foi causado no dilema MN, o que representou uma redução de 42,7% na fração dos cooperadores.

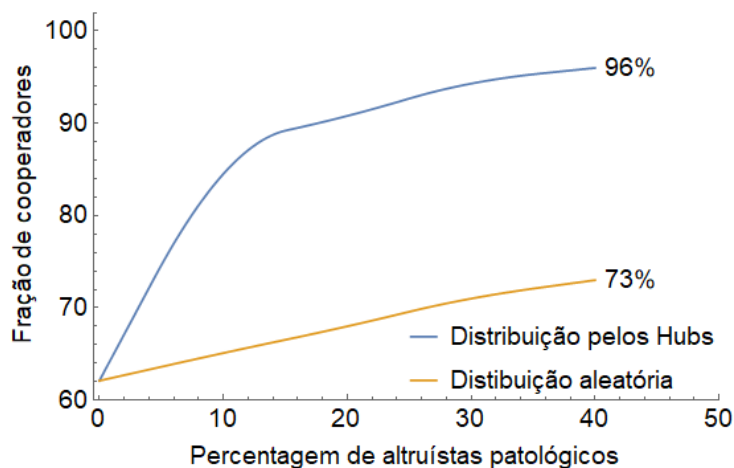


Figura 4.15: Evolução da fração de cooperadores na população. Resultados após analisar o impacto causado na fração de cooperadores ao introduzir altruístas patológicos pela população, caracterizada pelos dilemas DP, MN e CV. A distribuição foi realizada por *Hubs* e de forma aleatória. Os resultados mostram que o impacto causado na evolução da cooperação quando a distribuição é realizada por *Hubs* é muito maior e reflete a influência que estes agentes, com um número elevado de conexões, podem causar numa população com forte heterogeneidade.

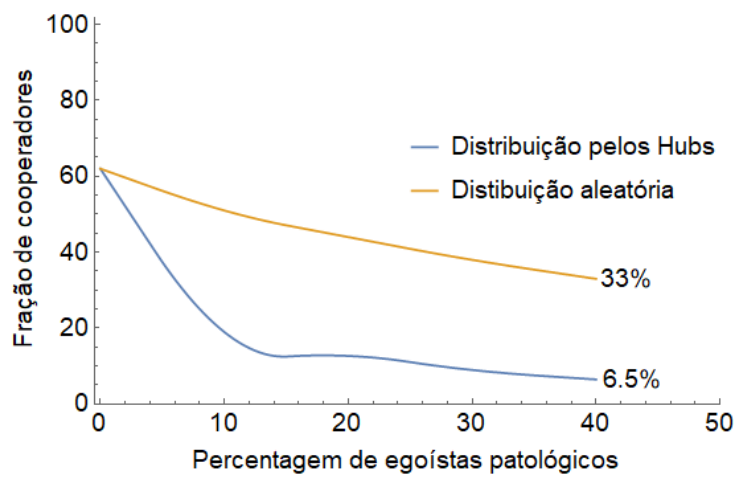


Figura 4.16: Evolução da cooperação. Para cada valor de  $\lambda$  é apresentada a percentagem de APs necessários para atingir no final da dinâmica de evolução 80% de cooperadores. Os APs necessários foram distribuídos de duas formas: aleatoriamente e pelos *Hubs*. Ao compararem-se as duas distribuições, constata-se que o número de APs necessário é sempre mais baixo quando a distribuição é realizada pelos *Hubs*, o que revela a grande influência exercida pelos *Hubs* numa população do tipo LE.

## Capítulo 5

# Conclusão

Filósofos e cientistas acreditam que os comportamentos cooperadores e altruístas desempenharam um papel fundamental para o sucesso da evolução humana desde os tempos da pré-história até os dias de hoje. Para abordar este problema, tem-se recorrido à Teoria dos Jogos Evolucionários em grafos aplicada aos dilemas sociais, utilizados para caracterizar as situações de tensão quando um indivíduo pode cooperar ou desertar.

Esta Dissertação teve como principal objetivo, aprofundar o impacto na evolução da cooperação ao distribuir por uma população com forte heterogeneidade agentes altruístas e egoístas patológicos que, por várias razões, são reticentes em mudar as suas escolhas, seja por convicções religiosas, políticas, ou outras. Foram considerados dois tipos de distribuição: aleatória ou direcionada aos agentes com o maior número de contatos. Após analisar os resultados, chegamos as seguintes conclusões:

- A distribuição dos agentes Altruístas Patológicos (APs) pelos *Hubs* representa um mecanismo potente para o aparecimento da cooperação. O efeito messiânico dos APs espalha-se por toda a população, mesmo em zonas mais críticas para os cooperadores, onde o grau de egoísmo e ganância são elevados.
- Este mecanismo, contudo, poderá ser usado para a redução da cooperação, caso o comportamento patológico seja de egoísmo. De facto, ao distribuírem-se agentes egoístas pelos *Hubs*, nota-se uma redução drástica na fração de agentes cooperadores em todos os dilemas. No dilema Monte de Neve (MN), onde a cooperação era abundante, foram precisos poucos Egoístas Patológicos (EPs) para reduzir para a metade a fração de cooperadores. Os cooperadores foram praticamente extintos no Dilema do Prisioneiro (DP) e também foram necessários poucos EPs para reduzir a fração de cooperadores a 0.1%.
- Após distribuírem-se os EPs de forma aleatória, o impacto causado em todos os dilemas foi pouco significativo, e a manutenção da fração dos cooperadores foi mantida com sucesso.
- A evolução da cooperação depende também das características intrínsecas a cada indivíduo. Neste sentido, é importante lembrar que a estrutura da população desenvolvida nesta Dissertação se mantém inalterada ao longo da evolução. Uma modelo mais realista, deveria ter em conta o facto dos agentes terem a capacidade de estabelecer novos contatos ou dissolver outros ao longo da evolução.

### 5.1 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, propõem-se:

- O desenvolvimento de um modelo mais real, tendo em conta que a mutação ao longo da evolução na estrutura da população.
- Aplicar o conceito de agentes altruístas e egoístas patológicos a outros jogos conhecidos, nomeadamente: o jogo do bom público e o jogo do ultimato, descritos no capítulo 2
- Estudar comportamentos patológicos com maior complexidade, nomeadamente no contexto de jogos repetidos. Neste caso, os agentes patológicos poderão adotar estratégias condicionais e decidir cooperar ou não dependendo das ações passadas dos restantes agentes. Estas situações são particularmente relevantes em ambientes híbridos, onde os agentes patológicos são entidades artificiais desenhadas para um determinado fim.

# Bibliografia

- Albert, R., & Barabasi, A. L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 47–97. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.74.47> (APS) doi: 10.1088/1478-3967/1/3/006
- Andreoni, J. (1988). Why free ride? *Journal of Public Economics*, 37(3), 291–304. (Elsevier) doi: 10.1016/0047-2727(88)90043-6
- Barabási, A.-L., & Albert, R. (1999, 10). Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286(5439), 509 LP - 512. Retrieved from <http://science.sciencemag.org/content/286/5439/509.abstract> (American Association for the Advancement of Science)
- Campbell, R. L. (2006). Altruism in Auguste Comte and Ayn Rand. *Journal of Ayn Rand Studies*, 7, 357–369.
- Easley, D., & Kleinberg, J. (2010). *Networks, crowds, and markets: Reasoning about a highly connected world*. Cambridge University Press.
- EISENBERG, N. (Ed.). (1982). *Eisenberg* (Tech. Rep.). San Diego. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012234980550002X><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780122349805500043><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780122349805500055><http://www.sciencedirect.com/science/article/> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-234980-5.50003-1>
- Hamilton, W. (1964). The genetical Evolution of Social Behavior II. *Journal of Theoretical Biology*, 7(1), 1–52. (Elsevier) doi: 10.1016/0022-5193(64)90039-6
- Hofbauer, J., & Sigmund, K. (1998). *Evolutionary Games and Population Dynamics*. Cambridge university press. doi: 10.1017/cbo9781139173179
- Kollock, P. (1998). *Social dilemmas: The anatomy of cooperation* (Vol. 24). Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA.
- Nowak, M. a. (2006). Five Rules for the Evolution of Cooperation. *Science*, 314(5805), 1560–1563. Retrieved from <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1133755> (American Association for the Advancement of Science) doi: 10.1126/science.1133755
- Page, K. M., Nowak, M. A., & Sigmund, K. (2000). The spatial ultimatum game. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 267(1458), 2177–2182. Retrieved from <http://rspb.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspb.2000.1266> (The Royal Society) doi: 10.1098/rspb.2000.1266
- Paiva, A., Santos, F. P., & Santos, F. C. (2018). Engineering pro-sociality with autonomous agents. In *Thirty-second aaai conference on artificial intelligence*.
- Paluck, E. L., Shepherd, H., & Aronow, P. M. (2016). Changing climates of conflict: a social network experiment in 56 schools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(3), 566–571. Retrieved from <http://www.pnas.org/content/early/2016/01/>

- 02/1514483113 (National Acad Sciences) doi: 10.1073/pnas.1514483113
- Pennisi E. (2005). How Did Cooperative Behavior Evolve. *AAAS*, 309. (American Association for the Advancement of Science)
- Santos, F. C., Pacheco, J. M., & Lenaerts, T. (2006a). Cooperation prevails when individuals adjust their social ties. *PLoS Computational Biology*, 2(10), 1284–1291. (Public Library of Science) doi: 10.1371/journal.pcbi.0020140
- Santos, F. C., Pacheco, J. M., & Lenaerts, T. (2006b). Evolutionary dynamics of social dilemmas in structured heterogeneous populations. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103(9), 3490–3494. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0508201103> (National Acad Sciences) doi: 10.1073/pnas.0508201103
- Santos, F. C., Santos, M. D., & Pacheco, J. M. (2008). Social diversity promotes the emergence of cooperation in public goods games. *Nature*, 454(7201), 213–6. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18615084> (Nature Publishing Group) doi: 10.1038/nature06940
- Skyrms, B. (2004). *The stag hunt and the evolution of social structure*. Cambridge University Press.
- Smith, J. M., & Price, G. R. (1973, 11). The Logic of Animal Conflict. *Nature*, 246(5427), 15–18. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1038/246015a0>
- Trivers, R. L. (1971). The Evolution of Reciprocal Altruism. *The Quarterly Review of Biology*, 46, 35–57. Retrieved from <https://doi.org/10.1086/406755> (Stony Brook Foundation, Inc.) doi: 10.1086/406755