

Você Devia se Envergonhar! O Papel das Normas Sociais em um Jogo Evolucionário de Recursos Comuns*

Resumo

Este estudo investiga a influência de normas sociais e monitoramento na gestão de recursos de uso comum (CPR). Com base na pesquisa de Elinor Ostrom, utilizamos a teoria dos jogos evolucionários para analisar como fatores subjetivos como culpa, vergonha e custos pecuniários moldam a conformidade individual com normas sociais e regras institucionais na governança de CPR. Nosso modelo demonstra que a microdiversidade inerente dentro dos jogos de CPR leva ao surgimento de múltiplos equilíbrios de longo prazo que governam a relação entre o estoque de um recurso natural e a fração de indivíduos que cumprem as normas sociais. Especificamente, para valores de parâmetros razoáveis, essa relação evolui ciclicamente. Essa descoberta fornece uma nova explicação teórica para a evidência de coexistência de estratégias de cooperação e não cooperação em comunidades de recursos de uso comum relatadas pela literatura empírica e experimental. Exploramos ainda mais as implicações políticas e institucionais dessas descobertas, destacando a importância de estruturas de governança adaptativa que podem acomodar a interação estratégica e dinâmica de agentes racionais limitados na gestão de recursos dentro de sistemas socioecológicos complexos.

Palavras-chave: Normas sociais, racionalidade limitada, jogos evolucionários, gestão de recursos naturais.

JEL Codes: Q32; Q56; D02.

Abstract

This study investigates the influence of social norms and monitoring on common pool resource (CPR) management. Building on Elinor Ostrom's research, we utilize evolutionary game theory to analyze how subjective factors such as guilt, shame, and pecuniary costs shape individual compliance with social norms and institutional rules in CPR governance. Our model demonstrates that the inherent microdiversity within CPR games leads to the emergence of multiple long-run equilibria governing the relationship between the stock of a natural resource and the fraction of individuals complying with social norms.

*Versão preliminar exclusivamente para fins de discussão. Por favor, não cite. Agradecemos a Gilberto Tadeu Lima e Jaylson Jair Silveira pelos comentários detalhados nas versões anteriores desta pesquisa.

Specifically, for reasonable parameter values, this relationship evolves cyclically. This finding provides a new theoretical explanation for the evidence of coexistence of cooperation and non-cooperation strategies in common pool resource communities reported by empirical and experimental literature. We further explore the policy and institutional implications of these findings, highlighting the importance of adaptive governance frameworks that can accommodate the strategic, dynamic interaction of bounded rational agents in resource management within complex socio-ecological systems.

Keywords: Social norms, bounded rationality, evolutionary games, natural resource management.

JEL Codes: Q32; Q56; D02.

1 Introdução

Muitos problemas da gestão dos recursos comuns em sistemas socioecológicos complexos envolvem interação estratégica (OSTROM, 2009). A Tragédia dos Comuns é um exemplo bem conhecido desse tipo de problema (HARDIN, 1968). Esse conceito ilustra uma situação na qual membros de uma comunidade que administra um recurso comum, ao agirem predominantemente por interesse próprio, acabam gerando resultados socialmente ineficientes, como a superexploração dos recursos naturais. A Tragédia dos Comuns é entendida como uma falha de coordenação estratégica em que a não exclusividade no acesso ao recurso natural contribuiu para que interesses pecuniários superem os benefícios da cooperação.

A literatura econômica discute três soluções para a Tragédia dos Comuns: privatização, controle governamental e abordagens institucionais. Todas as formas apresentadas utilizam mecanismos próprios para atenuar a ausência de direitos de propriedade bem definidos (DASGUPTA; MÄLER, 1997) ou para contornar a falta de instituições que regem as relações econômicas (NORTH, 1990). A regulação, no primeiro caso, ocorre devido à internalização da externalidade gerada pelas escolhas individuais, no segundo, acontece por meio do poder coercitivo que impõe restrições ao acesso e, no terceiro, é implementada por meio de regras formais e normas sociais capazes de evitar a superexploração dos recursos. Essa última via foi conhecida a partir do trabalho de Elinor Ostrom. Por meio de experimentos de campo, (1990;1994; 2010; 2010), estudos em laboratório (2005; 2009; 1994), e o desenvolvimento de modelos teóricos que incorporam os elementos observados empiricamente (1994; 1992; 2003; 2015), Ostrom demonstrou que comunidades locais podem gerenciar eficazmente recursos comuns sem necessidade de mercados ou intervenção estatal por meio de arranjos institucionais próprios, baseados em cooperação, regras compartilhadas e monitoramento mútuo.

Diversos mecanismos institucionais foram identificados como impulsionadores dessa autogovernança eficiente, tais como o papel da reciprocidade (DIXIT; LEVIN; RUBENSTEIN, 2012), da capacidade de comunicação e do trabalho de monitoramento acompanhado de sanções (GIBSON; WILLIAMS; OSTROM, 2005). A eficácia desses mecanismos depende essencialmente do funcionamento de normas sociais. Normas sociais são entendimentos compartilhados sobre as ações que são tanto obrigatórias, quanto permitidas ou proibidas pelo grupo (CRAWFORD; OSTROM, 1995). Representam “regras não escritas” pelas quais nos regemos, e muitos de nossos comportamentos podem ser compreendidos como motivados pela sua existência (BICCHIERI et al., 2023). A transmissão e o cumprimento das normas sociais depende de elementos sociais (expectativas sociais) e individuais (crenças e valores). O papel desempenhado pelos elementos individuais permanece pouco explorado na literatura sobre recursos comuns, especialmente no que diz respeito a como aspectos emocionais, como culpa e vergonha, influenciam a autogovernança eficiente. Esses elementos emocionais funcionam como um custo intrínseco, representando a angústia que alguns indivíduos podem

sentir por não utilizar a norma social, funcionando como um sentimento de culpa quando é autoinfligido, ou vergonha, quando esse comportamento é conhecido pelos demais (POSNER; RASMUSEN, 1999).

Os custos intrínsecos de culpa e vergonha envolvidos no cumprimento de normas sociais para a preservação do recurso natural tendem a ser mais expressivos na presença de monitoramento social (OSTROM, 1990). Uma vez que tenham feito autocompromissos contingentes de cooperar com a preservação, os indivíduos são motivados a monitorar o comportamento de outras pessoas para assegurar-se de que os outros estão seguindo as regras na maior parte do tempo (OSTROM, 2000). A literatura experimental reporta evidências que destacam a importância desse mecanismo de monitoramento social para a barganha eficiente. Slough et al. (2021), por exemplo, implementam ensaios randomizados para avaliar 400 comunidades que mantêm diferentes programas de monitoramento, sistemas de recurso e instituições de governança responsáveis pelos recursos comuns. O estudo constata que o monitoramento desempenhou um papel importante na redução da extração e degradação dos recursos, gerando informações relevantes sobre como o comportamento dos indivíduos afetava o estoque de recurso natural disponível.

As evidências também mostram que ambos os mecanismos colaboram para o surgimento de um comportamento cooperativo capaz de se manifestar também nos ambientes controlados de um laboratório. Estudos sugerem que o monitoramento é um meio de gerar informações sobre os demais membros do grupo, permitindo coordenar as respostas comportamentais para alcançar a cooperação (BROFELDT et al., 2014; OSTROM, 1990; OSTROM; GARDNER; WALKER, 1994). Apesar das percepções de laboratório apresentarem uma relação direta com as condições observadas nos experimentos de campo (RUSTAGI; ENGEL; KOSFELD, 2010), as descobertas empíricas ainda não foram devidamente integradas em uma teoria de ação coletiva amplamente aceita e revisada (OSTROM, 2000), levando a um hiato entre a previsão teórica do comportamento dos indivíduos e o que foi observado nas pesquisas empíricas.

Este estudo busca desenvolver uma contribuição teórica neste sentido, modelando o papel de custos subjetivos intrínsecos relacionados à culpa e vergonha provenientes do monitoramento social em um jogo de *Common Pool Resource* (CPR). Baseado em evidências experimentais, desenvolvemos um jogo evolucionário que formaliza um mecanismo que ilustra, em um de seus vários aspectos relevantes, como as elementos individuais subjetivos do cumprimento de normas sociais e os aspectos de conformidade relacionados ao monitoramento social contribuem para a autogovernança de um recurso comum (EISENBARTH; GRAHAM; RIGTERINK, 2021; CARPIO; ALPIZAR; FERRARO, 2021; SLOUGH; KOPAS; URPELAINEN, 2021).

No modelo, indivíduos que compartilham o acesso ao CPR utilizam um mecanismo de monitoramento social para verificar se os limites de extração impostos pela comunidade são respeitados. Com base em evidências empíricas, (ACHESON, 1988; OSTROM, 1990; VOLLAN; OSTROM, 2010), definimos que a comunidade consegue identificar e mensurar o nível de extração capaz de evitar o esgotamento do recurso natural. Como monitorar o CPR exige esforço por parte dos indivíduos, supomos que apenas os membros cooperadores realizam essa tarefa. Por outro lado, os não cooperadores, aqueles que decidiram extrair acima do limite acordado, correm o risco de serem identificados e sancionados. O custo daqueles que estão se apropriando de uma parcela maior do recurso natural é modelado sob duas perspectivas, uma subjetiva, que capta o sentimento de culpa ou vergonha por descumprir a norma social, e outra objetiva, que mensura o custo direto da não cooperação em termos de multas.

Inseridos em um contexto de racionalidade limitada e informação local, supomos que a massa cooperadores e não cooperadores do jogo evolucionário evolui no tempo conforme uma dinâmica de replicação (HOFBAUER; SIGMUND, 1998). Essa dinâmica evolucionária guarda um relacionamento endógeno com a evolução do estoque do recurso natural. Considerando que o estoque do recurso apresenta

um potencial de regeneração limitado, quanto maior a fração de não cooperadores, maior também será o impacto negativo no estoque de recursos naturais. Por outro lado, quanto maior a fração de cooperadores, mais próximo será o nível de extração do socialmente ótimo. Ao afetar a capacidade de extração, os níveis do estoque de recurso natural afetam as decisões estratégicas de cooperação ou não cooperação.

Para valores razoáveis dos parâmetros, o modelo mostra que a relação entre o estoque do recurso natural e a massa de indivíduos que cooperam com sua a gestão eficiente apresenta duas configurações possíveis no longo prazo. Se o benefício marginal de extração for relativamente mais alto do que o efeito dos custos sociais subjetivos no *payoff* dos cooperadores e não cooperadores, o sistema socioecológico evolui ciclicamente no tempo. Por outro lado, se o efeito dos custos sociais subjetivos for suficientemente alto, a dinâmica é caracterizada por um ponto de sela, em que a estratégia cooperar emerge como uma solução evoluicionariamente estável apenas se o sistema socioecológico contar com uma fração suficientemente alta de membros que agem em conformidade com as normas sociais. Para cada cenário, exploramos como o sistema socioecológico pode sustentar um equilíbrio cooperativo de longo prazo em que o estoque do recurso natural esteja mais próximo do seu nível socialmente eficiente. Nossos resultados oferecem uma nova base teórica para evidências empíricas e experimentais importantes da literatura de recursos comuns.

De maneira mais ampla, nossa contribuição teórica está relacionada ao desenvolvimento de um novo jogo evolucionário de *Common Pool Resource* com monitoramento social que incorpora diferentes elementos pecuniários e características comportamentais observadas em diversos experimentos de campo e estudos empíricos (MELO; PIAGGIO, 2015; OSTROM, 1990; RUSTAGI; ENGEL; KOSFELD, 2010). Embora a maioria das contribuições dessa tradição se concentre na interação estratégica entre os membros da comunidade que compartilham um recurso comum, nossa abordagem é diferente. O modelo considera o papel do monitoramento como um meio de gerar informações e permitir que punições, sociais e pecuniárias, sejam aplicadas. Tal comportamento, apesar de amplamente verificado na literatura empírica, ainda não foi aplicado a uma estrutura analítica baseada em jogos evolucionários. A dinâmica evolucionária permite explicar porque as normas de comportamento que limitam o uso do recurso podem persistir mesmo quando a escolha racional sugere o oposto.

Além desta introdução, este estudo está organizado em quatro seções. A próxima seção apresenta o comportamento do modelo no curto prazo. A dinâmica evolucionária é apresentada e as condições de (in)stabilidade do sistema socioecológico são exploradas na seção três, em que os principais resultados e implicações institucionais também são cuidadosamente explorados. Por fim, a seção quatro apresenta breves considerações finais e sugestões para pesquisa futura.

2 Estrutura do modelo

Considere um jogo estático em que um número fixo de n participantes têm direito de acesso e extração de um determinado recurso natural — como peixes, árvores, água ou pasto — que está disponível para o uso comum e gera benefícios para os indivíduos, tanto em termos de insumos e serviços para o processo produtivo, quanto pela possibilidade de contemplação (DASGUPTA; HEAL, 1980). Seguindo a mesma nomenclatura proposta e mantida por Ostrom (1994; 2000), nos referimos a essa estrutura como um jogo de *Common Pool Resource*. Jogos de CPR são amplamente utilizados como referência em pesquisas empíricas e experimentais (OSTROM; WALKER; GARDNER, 1992; OSTROM; GARDNER; WALKER, 1994). No modelo, o esforço empregado na extração de recursos por cada indivíduo i , em cada momento no tempo, é

dado por $x_{i,t}$. A soma dos fluxos de esforços individuais agregados é dado por:

$$X_t = \sum_{i=1}^n x_{i,t}. \quad (1)$$

O estoque total de recurso natural disponível é representado por S_t , enquanto a extração desse recurso por unidade de tempo é dada por uma função, $H_t(X_t, S_t)$ que combina o fluxo de esforço agregado, X_t , com o estoque de recursos existentes, S_t . A extração de recursos por cada unidade de tempo, H_t , é uma função crescente em seus dois argumentos, logo, $H_X > 0$ e $H_S > 0$.¹ Para um determinado estoque, a extração adicional gerada por uma unidade extra de esforço deve diminuir conforme o total de esforço aumenta, $H_{XX} < 0$. Ademais, quanto maior o nível do estoque do recurso natural disponível, maior será o aumento marginal na extração agregada a cada unidade extra de esforço, $H_{XS} > 0$. Tais suposições são válidas para todo $X_t \geq 0$ e $S_t \geq 0$. Como é necessário que haja esforço e recurso natural para que a extração aconteça, também supõe-se que essas variáveis são complementares, $H(0, S) = H(X, 0) = 0$.

Como no curto prazo o estoque do recurso natural está dado, S_0 , a função de extração do recurso natural agora pode ser aproximada de uma função côncava e crescente que utiliza o esforço como insumo, $f(X_t) = H_t(X_t, S_0)$. Para extrair o recurso natural e utilizá-lo, é necessário que o indivíduo exerça esforço, tal como sair de casa para pescar lagostas, levar os animais ao pasto da comunidade, extrair lenha da floresta ou utilizar água da superfície para irrigar suas plantações. Mesmo que esse tipo de ação traga benefícios, os indivíduos ainda se defrontam com um custo de oportunidade, tendo em vista que eles poderiam usar o tempo destinado a essa tarefa para o lazer ou qualquer outra atividade. O custo de oportunidade de imprimir esforço nas atividades de extração é representado por $\delta \in \mathbb{R}_+$ para cada unidade de esforço individual $x_{i,t}$, sendo um valor constante e exógeno. Dadas as características dessas funções, o valor da extração agregada, $f(X_t)$, excede o custo total de esforço da comunidade, δX_t , até um determinado nível de esforço total, X_0 , e deve cair a partir desse ponto. Consequentemente, a função de extração deve cruzar a linha δX_t em X_0 no plano $(f(X_t), X_t)$. Assim, o benefício líquido obtido pelo indivíduo i referente a extração total de recursos é proporcional a sua parcela de esforço em relação ao grupo, de modo que o *payoff* do indivíduo i pode ser descrito como:

$$\pi_{i,t}(x_{1,t}, \dots, x_{n,t}) = \frac{x_{i,t}}{\sum x_{i,t}} f(X_t) - \delta x_{i,t}, \quad (2)$$

fazendo com que o *payoff* de toda comunidade seja expresso como:

$$P(x_{1,t}, \dots, x_{n,t}) = \sum \pi_{i,t} = f(X_t) - \delta X_t. \quad (3)$$

Uma referência para o nível de esforço agregado eficiente, $X_{e,t}$ é aquele capaz de maximizar o *payoff* de toda comunidade, fazendo como que o produto marginal do esforço seja igual ao custo de oportunidade dessa ação, $f'(X_{e,t}) = \delta$. Devido à concavidade da função $f(X_t)$, sabe-se que $X_{e,t}$ é único. A fim de medir a relação extração-esforço, é possível reescrever a função de *payoff* em termos do produto médio do esforço, dado por $A(X_t) = \frac{f(X_t)}{X_t}$. A concavidade de $f(X)$ também garante que essa relação é decrescente, ou seja, quanto mais esforço é aplicado a extração, o total de extração por unidade de trabalho cai. O *payoff* do indivíduo i agora pode ser escrito:

$$\pi_{i,t}(x_{i,t}, X_t) = x_{i,t}[A(X_t) - \delta]. \quad (4)$$

¹ Os termos H_X e H_S indicam as derivadas parciais de primeira ordem, enquanto H_{XX} representa a derivada parcial de segunda ordem e H_{XS} indica uma derivada parcial cruzada.

Considerando que o recurso natural é caracterizado pelo acesso aberto e o número de usuários possa se expandir, então o grau de esforço aplicado será grande o suficiente para igualar o custo de oportunidade. Apesar desse ponto caracterizar uma escolha racional do ponto de vista individual, ele é ineficiente, pois envolve um grau de esforço, e extração, superior ao que seria ótimo para a comunidade, gerando um caso de superexploração. No nível eficiente para a comunidade, (X_e) , o esforço é dado até o ponto em que o resultado adicional, $A(X_t) - \delta$, de uma unidade extra de esforço é compensada pela perda proveniente da queda no produto médio do esforço, dado por $X_{e,t}A'(X_{e,t})$. Contudo, do ponto de vista individual, a extração extra dada por uma unidade adicional de esforço permanece a mesma, mas a perda do produto médio, $\frac{X_{e,t}A'(X_{e,t})}{n}$, é compartilhada por todos os membros da comunidade. Isso faz com que os indivíduos escolham um nível de esforço acima do que é eficiente. Essa condição representa o problema clássico dos comuns, em que o que é bom em um nível individual nem sempre é eficiente do ponto de vista da comunidade. A prova desse equilíbrio simétrico com superexploração é feita em [Dasgupta e Heal \(1980\)](#). Esse jogo também resulta em um equilíbrio de Nash único com $x_{i,t} = x_{N,t}$ para todos os jogadores i , envolvendo a superexploração, $X_{e,t} < X_{N,t}$, que é provado em [Sethi e Somanathan \(1996\)](#).

Diferentes estudos empíricos e experimentais têm expandido o jogo de CPR clássico para modelar aspectos comportamentais em um contexto de monitoramento social ([MARROCOLI et al., 2018](#); [ANDERIES et al., 2011](#)). Esse conjunto de evidências motiva a maneira pela qual a microdiversidade de um jogo de CPR pode ser expandida teoricamente. Considere agora que ao invés de um *continuum* de possíveis níveis de esforço em extração, há apenas duas possibilidades, x_c e x_{nc} , que denotam o grau de esforço de indivíduos preocupados com a manutenção do bem e que seguem a norma social delimitada pelo grupo (chamados de cooperadores), e os que não seguem a norma e empregam um nível de extração acima do nível socialmente ótimo (não cooperadores), impondo uma externalidade ambiental negativa para a comunidade. Essa relação satisfaz $x_e \leq x_c < x_{nc} \leq x_N$, indicando que o grau de esforço escolhido pelos membros da comunidade varia em um intervalo entre o equilíbrio socialmente ótimo e o equilíbrio de Nash. Tal condição resulta na escolha de um nível de esforço próximo ou igual ao ótimo social por parte dos cooperadores, enquanto os não cooperadores imprimem um nível de esforço mais alto, embora ele seja limitado pelo valor estabelecido no equilíbrio de Nash. Note que os membros não deverão imprimir menos esforço do que o socialmente ótimo, dado que não há benefício pessoal ou social para essa escolha, logo $x_i \geq x_e$.

A extração de recursos ocorre continuamente ao longo do tempo, com cada indivíduo adotando exatamente uma das duas estratégias puras. Seja, $\lambda_t \in (0, 1) \in \mathbb{R}$ e $1 - \lambda_t$ a proporção de indivíduos que são cooperadores e não cooperadores, respectivamente.² Em cada período, os membros da comunidade se encontram aleatoriamente, de maneira que a probabilidade de encontrar um cooperador é dada por λ_t , enquanto a probabilidade de encontrar um não cooperador é de $1 - \lambda_t$. Como há apenas dois níveis de extração que podem ser escolhidos, a extração agregada dos recursos pode ser definida como a soma do total de extração de cada subpopulação (cooperadores e não cooperadores):

$$X_t = X_{nc,t} + X_{c,t}, \quad (5)$$

² Como n é finito e apenas estratégias puras são jogadas, os valores admissíveis de λ_t serão discretos. Abstraímos isso e permitimos que as parcelas da população assumam quaisquer valores não negativos cuja soma seja a unidade. Na maioria dos bens comuns locais, n varia de algumas dezenas a algumas centenas. Ademais, por clareza da exposição matemática, o subscrito t denota tempo contínuo.

que também pode ser expresso por meio da proporção de agentes:³

$$X_t = [x_{nc}\lambda_t + x_c(1 - \lambda_t)]. \quad (6)$$

De acordo com [Ostrom \(2000\)](#), uma vez que alguns indivíduos tenham feito autocompromissos contingentes, eles passam a monitorar o comportamento dos outros usuários a fim de assegurar o cumprimento das regras de extração. Assim, no modelo, os cooperadores são responsáveis pelo monitoramento e punição. Essa abordagem segue a estrutura proposta por [Sethi e Somanathan \(1996\)](#), ao supor que sempre que um membro cooperador encontra um não cooperador em t , há punição com probabilidade de 100%, ou seja, não há como enganar e mascarar o comportamento não cooperativo, bem como corromper o cooperativo. Nessa abordagem, os indivíduos só revisam suas estratégias no próximo período.⁴

Como os indivíduos conhecem os limites de extração que permite respeitar o ritmo de renovação do recurso natural, a comunidade procura limitar o acesso, fazendo desse nível uma norma social conhecida por todos ([COLEMAN, 1990](#)). Os indivíduos podem escolher entre seguir a norma ou violar essa regra, imprimindo um esforço de extração acima do ótimo. Os aspectos morais e incentivos pecuniários não afetam apenas os indivíduos punidos, mas também os punidores, já que pode ser custoso impor a punição aos membros egoístas da comunidade, tendo em vista que colocar alguém no ostracismo pode acabar com a possibilidade de interações benéficas. Estudos mostram que o custo de punir pode até ser baixo, mas raramente é inexistente ([OSTROM, 1990](#); [FEHR](#); [GACHTER, 2000](#); [ROCKENBACH](#); [MILINSKI, 2006](#)).

A presença de heterogeneidade individual nos permite explorar mecanismos de sanção para os não cooperadores com base nas informações obtidas pelo monitoramento, assim como a incorporação do custo de efetuar a punição por parte dos cooperadores. Nesse sentido, supomos que o *payoff* individual guarda uma relação de correspondência direta com sua utilidade subjetiva, podendo ser construído como uma combinação de elementos objetivos e subjetivos ([GÜTH; KLIEMT, 2000](#)). Em especial, o *payoff* dos não cooperadores é afetado por um elemento de custo objetivo e outro subjetivo. O custo objetivo é uma punição, uma multa ou penalidade pago pelo não cooperador, se for identificado por um cooperador. Definimos esse custo como $\sigma\lambda_t$, em que $\sigma \in \mathbb{R}_+$ é um parâmetro exógeno e fixo no tempo, representando o custo em unidades de CPR, enquanto λ_t mensura a probabilidade de encontrar randomicamente um cooperador. Supomos que o montante esperado de multas, $(1 - \lambda_t)\sigma\lambda_t$, é redistribuído igualmente entre os cooperadores. Portanto, o valor que cada cooperador recebe é equivalente a $(1 - \lambda_t)\sigma$. Esse mecanismo visa diluir o impacto das ações dos não cooperadores por meio de redistribuição do total acumulado.⁵

O elemento subjetivo que afeta o *payoff* dos não cooperadores é motivado por um conjunto de evidências empíricas e outras contribuições teóricas que avaliam os efeitos do sentimento de culpa e vergonha relacionados ao não cumprimento de uma norma social ([BOWLES; GINTIS, 2011](#)). [Melo e Piaggio \(2015\)](#) investigam os efeitos da punição por pares entre comunidades de pescadores artesanais uruguaios. O estudo mostra que a expectativa de reprovação social motivada por culpa e vergonha está

³ Podemos alcançar esse mesmo resultado ao considerar que existe um *continuum* de indivíduos normalizados para 1, de modo que a extração agregada das subpopulações é dada por $X_{nc,t} = \int_0^{\lambda_t} x_{nc}n dz = x_{nc}n\lambda_t$ e $X_{c,t} = \int_{\lambda_t}^1 x_c n dz = x_c n(1 - \lambda_t)$, que ao substituir em (5) e, considerando que a população é normalizada para 1, o total de extração realizada pela comunidade é a soma das integrais, gerando a expressão apresentada em (6).

⁴ Uma extensão do modelo envolve a possibilidade de modelar a corrupção dos cooperadores. Tal modelo envolve uma modelagem por meio de jogos de conformidade. Para manter o foco no papel das normas sociais que resultam em custos subjetivos, abstraímos inicialmente desta outra estrutura analítica.

⁵ [Ostrom \(1990\)](#) documentou um mecanismo de redistribuição semelhante a este adotado nas comunidades em Torbel e Valência. Em ambas, o valor era distribuído entre os responsáveis pela fiscalização do recurso comum e os membros que estavam cumprindo as normas estabelecidas, que neste modelo estão agrupados na subpopulação de cooperadores.

relacionada a redução nos níveis de extração.⁶ O sentimento de vergonha também se mostrou influente em outros contextos, como na cobrança de dívidas fiscais e no mercado de doações para a caridade. [Perez-Truglia e Troiano \(2018\)](#), por exemplo, enviaram cartas a inadimplentes fiscais de três estados dos EUA, concluindo que o aumento da visibilidade da condição de inadimplente aumentou a conformidade dos indivíduos. [Butera et al. \(2022\)](#) mostram que a construção de uma imagem social, que gera efeitos de bem-estar associados a vergonha ou orgulho, influencia o número e o volume de doações para caridade. Em todos os experimentos realizados no estudo, o reconhecimento público foi capaz de motivar o comportamento desejado.

Assim, o modelo supõe que o monitoramento social busca gerar informações sobre o comportamento de cada indivíduo, atuando como um mecanismo capaz de influenciar a expectativa de reprovação social dos não cooperadores. Essa expectativa de reprovação social gera o custo intrínseco associado ao sentimento de culpa e vergonha, ς_s , elementos que embora distintos por natureza, frequentemente se entrelaçam em situações que envolvem uma violação normativa. A expressão que define o custo subjetivo intrínseco é representada por:

$$\varsigma_s = \lambda_t \phi^*(x_{nc} - x_c), \quad (7)$$

em que $x_{nc} - x_c > 0$ captura a ideia de que cada indivíduo não cooperador enfrenta um custo subjetivo ligado à culpa e a vergonha sempre que o grau de esforço em extração for superior ao nível ótimo determinado pela norma social, independente de ser pareado ou não com um cooperador. Embora elas sejam distintas em sua natureza social, elas frequentemente se entrelaçam quando se trata de situações que envolvem uma violação normativa. A fim de capturar essas características, [Fehr e Gächter \(2000\)](#), apresentam evidências de que os não cooperadores enfrentam um custo de bem-estar tanto maior quanto mais se desviam dos níveis de cooperação dos cooperadores. Ao seu turno, $0 \leq \phi \leq 1$ mede a suscetibilidade dos indivíduos à reprovação social, sendo que quanto mais próximo de 1, maior será o impacto da reprovação social percebido pelo indivíduo, e quanto mais próximo de 0, maior será a indiferença quanto à culpa ou vergonha por imprimir um grau de extração superior ao nível ótimo. Trata-se de um parâmetro que converte o diferencial de níveis de extração em uma medida subjetiva.⁷ Supõe-se ainda que o custo intrínseco será tão maior quanto maior a fração de indivíduos que optam pela estratégia cooperar, λ_t . Ou seja, quando grande parte da comunidade segue a norma social, não segui-la é subjetivamente mais custoso.

A combinação de aspectos pecuniários e sociais contribui para criação de um sistema de sanções que pode induzir e sustentar ao longo do tempo a cooperação ([OSTROM, 2000](#)). Desse modo, o custo total dos não cooperadores, ς_{nc} , pode ser escrito da seguinte forma:

$$\varsigma_{nc} = \lambda_t [\sigma + \phi(x_{nc} - x_c)]. \quad (8)$$

Enquanto os indivíduos não cooperadores enfrentam custos pecuniários e sociais, os punidores também enfrentam uma perda associada ao ato de punir, tendo em vista que tanto a punição social quanto a pecuniária exigem algum tipo de ostracismo por parte dos cooperadores. Logo, o custo de realizar a punição, ς_p , é representado pelo valor unitário de executar a punição, dado por $\gamma \in \mathbb{R}_+^*$, e a proporção de não cooperadores presente na comunidade, $(1 - \lambda_t)$, conforme segue:

$$\varsigma_c = \gamma(1 - \lambda_t). \quad (9)$$

⁶ O experimento utilizado permite que os indivíduos escolham quantas redes de pesca podem usar e depois informa a todos sobre o volume de redes que cada grupo escolheu, preservando um certo grau de anonimato. Posteriormente, são divulgadas as médias de cada grupo. A reprovação social foi implementada por meio de um sistema de bandeiras com as cores amarela, laranja e vermelha para representar o grau de descontentamento dos demais grupos com a média de cada um, conduzindo a uma redução na extração em rodadas subsequentes.

⁷ Assumimos que ϕ é igual para todos os não cooperadores.

Dadas as parcelas da população em qualquer momento no tempo, assume-se que cada um dos cooperadores sanciona cada um dos não cooperadores uma única vez. Considerando tais mecanismos no jogo de *Common Pool Resource* com monitoramento e punição, o *payoff* do indivíduo i pode ser descrito por meio das equações (4), (8) e (9):

$$\pi_{j,t} = \begin{cases} \pi_{c,t} = x_c[A(X_t) - \delta] + (\sigma - \gamma)(1 - \lambda_t), & \text{se } j = c; \\ \pi_{nc,t} = x_{nc}[A(X_t) - \delta] - \lambda_t[\sigma + \phi(x_{nc} - x_c)], & \text{se } j = nc. \end{cases} \quad (10)$$

Os custos sociais associados à implementação de uma norma social já foram explorados como uma possível justificativa para a emergência e estabilidade do comportamento cooperativo em outros contextos. Com o intuito de verificar a existência de reciprocidade em bandos móveis de caçadores-coletores no final do Pleistoceno, [Bowles e Gintis \(2004\)](#) investigam como um alto nível de cooperação pode ser sustentado, mesmo sem o parentesco genético dos membros de um grupo. A pesquisa sugere que a possibilidade de uma punição altruísta, realizada por meio de uma forma de ostracismo por meio de indivíduos que são reciprocadores, faz com que altos níveis de cooperação sejam sustentados. [Gintis \(2003\)](#), por outro lado, verifica a capacidade de uma comunidade de internalizar uma norma social por meio de sanções — como vergonha, culpa, redução na autoestima — em detrimento de sanções puramente materiais. Os resultados obtidos indicam que se uma norma interna melhora a aptidão, então ela pode ser evolucionariamente estável.

Diante da inclusão da possibilidade de monitoramento, é possível verificar que, enquanto o jogo supõe que indivíduos decidem de maneira racional, ainda haverá superexploração. Uma vez que o nível de esforço seja escolhido, qualquer indivíduo que decidir punir incorrerá em um custo $\gamma(1 - \lambda_t)$ que reduzirá seu *payoff*, independentemente das escolhas dos outros membros da comunidade. Isso significa que a promessa de punição não é crível em um cenário em que os indivíduos são racionais e otimizadores, sendo ineficiente para dissuadir os não cooperadores. Portanto, embora um grande número de equilíbrios de Nash sejam possíveis no jogo de *Common Pool Resource* com monitoramento — alguns com altos níveis de extração e outros com baixos, separados por pontos de equilíbrios instáveis, a depender dos valores dos parâmetros — existe um único equilíbrio de Nash perfeito de subjogo em que todos os agentes escolhem $x_{N,t}$ e as sanções não são implementadas.⁸ Considerando que os agentes possuem informações completas, o resultado se aplica para qualquer repetição finita do jogo, conforme já observado por [Ostrom, Gardner e Walker \(1994\)](#). A fim de verificar se essa estrutura pode representar os casos em que o comportamento cooperativo é sustentado, adotamos uma abordagem baseada na teoria de jogos evolucionários descrita na seção seguinte.

3 Dinâmica evolucionária e recursos naturais no longo prazo

No curto prazo as frações de cooperadores e não cooperadores estão dadas, assim como o estoque do recurso natural. Entretanto, no longo prazo, elas variam em tempo contínuo. Dado que o padrão de crescimento econômico apresenta consideráveis implicações para a degradação do recurso natural e também para o declínio econômico daqueles que dependem direta ou indiretamente dele, uma forma de avaliar tais implicações é por meio de um modelo formal que liga a dinâmica evolucionária e a dinâmica dos recursos renováveis. Para explorar essa relação, adotamos uma estratégia de modelagem do estoque de recurso natural similar a de [Brander e Taylor \(1998\)](#).

O estoque do recurso natural no momento t é S_t . É conveniente pensar no estoque de recursos como um elemento suficientemente geral desse complexo, desde que tenha a propriedade de não excludente, porém

⁸ Para mais detalhes, ver [Bowles \(2004\)](#).

rival. A taxa de variação do estoque de recurso natural no tempo, $\frac{dS_t}{dt} \equiv \dot{S}_t$, é definida como a diferença entre a taxa de crescimento natural, $G(S_t)$, e a taxa de extração desse recurso, H_t :

$$\dot{S}_t = G(S_t) - H_t. \quad (11)$$

Além da dependência da função de extração, a evolução do estoque do recurso natural depende da sua própria taxa natural de reposição, apresentada pela função diferenciável $G(S)$. Existe uma capacidade limite para a regeneração do recurso natural, dada por S_k , de modo que $G(S) < 0$ para qualquer $S > S_k$ e $G(S_k) = 0$. A taxa de crescimento natural, $G(S_t)$, pode ser definida por uma função logística, sendo essa uma forma funcional simples para representar o crescimento biológico de um ambiente, como segue:

$$G(S_t) = rS_t \left(1 - \frac{S_t}{S_k}\right), \quad (12)$$

em que r é a taxa de crescimento intrínseca do recurso natural e S_k representa a capacidade limite de regeneração desse recurso, pois quando $S_t = S_k$ não há crescimento adicional do estoque. Assumimos que a extração, $H(S_t, X_t)$, é uma função do tamanho do estoque de recurso natural disponível e da quantidade do esforço agregado dessa comunidade, conforme a função de produção de [Schaefer \(1957\)](#), estendida para o contexto de heterogeneidade de estratégias de exploração. Logo, pode ser descrita como:

$$H(S_t, \lambda_t) = \alpha S_t X_t = \alpha S_t [x_c \lambda_t + x_{nc}(1 - \lambda_t)], \quad (13)$$

em que $\alpha \in \mathbb{R}_+$ representa uma constante de proporcionalidade da função. Logo, substituindo (12) e (13) em (11), temos:

$$\dot{S}_t = S_t \left[r - \frac{r}{S_k} S_t - \alpha (x_c \lambda_t + x_{nc}(1 - \lambda_t)) \right]. \quad (14)$$

A partir desse ponto, desconsideramos o comportamento dos indivíduos baseado na racionalidade plena, mas mantemos a lógica econômica de que eles reagem a incentivos, bem como a normas sociais, e podem mudar de estratégia conforme seu benefício supera a escolha atual. Os diferenciais de *payoff* devem exercer uma pressão evolucionária sobre a composição dessa população, produzindo um influxo para as estratégias com maiores resultados. Tal condição faz com que os retornos de cada estratégia em qualquer momento no tempo dependa da composição dessa população, ou seja, da proporção de indivíduos cooperadores e não cooperadores. Essa abordagem permite identificar se resultados diferentes daquele encontrado no jogo de *Common Pool Resource* podem emergir diante da pressão evolutiva.

Uma das maneiras mais simples de representar o efeito dessa pressão evolucionária é por meio da dinâmica do replicador ([TAYLOR; JONKER, 1978](#)); ([HOFBAUER; SIGMUND, 1998](#)). Em um contexto de *Common Pool Resource*, a dinâmica do replicador captura características importantes do comportamento dos indivíduos, pois ela considera que os *payoffs* são conhecidos pelos membros do grupo, o que está ligado com a realidade das comunidades avaliadas em estudos empíricos. As evidências experimentais também demonstram que essas pessoas conhecem o nível de esforço socialmente ótimo ([ACHESON, 1988](#); [OSTROM, 1990](#); [VOLLAN; OSTROM, 2010](#)), permitindo que elas tenham informações claras sobre o *payoff* dos demais. Além de sua ampla utilização na literatura, a dinâmica do replicador também foi utilizada em pesquisas que exploram o papel de custos sociais como um mecanismo para levar ao surgimento de um comportamento cooperativo, tal como em [Bowles e Gintis \(2004\)](#), [Gintis \(2003\)](#) e [Sethi e Somanathan \(1996\)](#).⁹ Esta dinâmica pode ser representada como:

$$\dot{\lambda}_t = \lambda_t (\pi_{c,t} - \bar{\pi}_t), \quad (15)$$

⁹ Uma possibilidade alternativa promissora seria modelar a interação estratégica utilizando uma dinâmica *satisficing*. Nesse tipo de dinâmica, os elementos subjetivos ganham ainda mais importância relativa.

em que $\bar{\pi}_t$ indica o *payoff* médio da população e pode ser expresso como $\bar{\pi}_t = \lambda_t \pi_{c,t} + (1 - \lambda_t) \pi_{nc,t}$. Essa expressão mostra que a taxa de crescimento da parcela da população que utiliza a estratégia de cooperação é proporcional ao valor pelo qual o retorno dessa estratégia excede o retorno médio da outra estratégia. Também é verificável que as parcelas da população λ_t e $(1 - \lambda_t)$ somam um e permanecem não negativas na composição da dinâmica do replicador.

Essa representação matemática permite identificar os pontos de equilíbrio da dinâmica do replicador, ou seja, qual estratégia ou combinações de estratégias podem sobreviver no longo prazo. No jogo estático, foi observado que todos os jogadores não cooperam, fazendo com que o grau de extração equivalente ao ótimo social seja ultrapassado. Agora é possível verificar se esse é o único comportamento que se mantém no longo prazo ou se outras possibilidades são apresentadas. Para responder a todos os pontos apresentados, pode-se avaliar um estado estacionário da equação dinâmica (15), ou seja, um ponto de equilíbrio em que $\dot{\lambda}_t = 0$. Um equilíbrio assintoticamente estável é todo aquele que é estável e apresenta uma vizinhança, tal que, começando na vizinhança o sistema converge para o ponto de equilíbrio no longo prazo. Dado que $A(X_t, S_t) = \frac{f(X_t, S_t)}{X_t} = \frac{H(S_t, X_t)}{X_t} = \frac{\alpha S_t X_t}{X_t} = \alpha S_t$, podemos representar o produto médio do trabalho. Substituindo os valores de $\pi_{c,t}$ e de $\pi_{nc,t}$, dados em (10), obtemos a seguinte dinâmica do replicador:

$$\dot{\lambda}_t = \lambda_t(1 - \lambda_t) [(x_c - x_{nc})(\alpha S_t - \delta) + (\sigma - \gamma)(1 - \lambda_t) + \lambda_t((x_{nc} - x_c)\phi + \sigma)]. \quad (16)$$

Essa relação implica que a taxa de crescimento da parcela da população que usa a estratégia de cooperação é proporcional ao valor pelo qual o retorno dessa estratégia excede o retorno da não cooperação. A estrutura analítica apresentada se assemelha à formalizada na contribuição de [Sethi e Somanathan \(1996\)](#), porém com diferenças importantes. Enquanto os autores adotam uma abordagem descentralizada de sanções em resposta aos níveis de extração observados, desenvolvemos uma estrutura de monitoramento que não só gera informações, mas viabiliza a aplicação de multas pecuniárias e gera custos morais intrínsecos. Ademais, distinguimos cuidadosamente entre custos sociais e pecuniários para avaliar como cada um desses canais impacta a emergência da cooperação na comunidade formalizada no modelo.

3.1 Análise de (in)estabilidade local

A existência de custos objetivos e subjetivos governando os incentivos e criando pressões morais na gestão estratégica do recurso comum levanta a possibilidade de equilíbrios múltiplos no longo prazo. Essa configuração será examinada por meio de uma análise qualitativa do sistema dinâmico (14) e (16). A transição de estados dessa economia é determinada pelo sistema de equações diferenciais ordinárias (14) e (16), com espaço de estados determinado por $\Theta \equiv \{(\lambda, S) \in \mathbb{R}^2 : 0 \leq \lambda \leq 1, 0 \leq S \leq S_k\}$. Para valores razoáveis dos parâmetros, o Apêndice A detalha as demonstrações que mostram a existência de três pontos de equilíbrios de longo prazo, λ^* e S^* , que satisfazem $\dot{S}_t = \frac{dS_t}{dt} = \dot{\lambda}_t = \frac{d\lambda_t}{dt} = 0$: dois equilíbrios monomórficos ($\lambda^* = 0$ e $\lambda^* = 1$) e um polimórfico.¹⁰

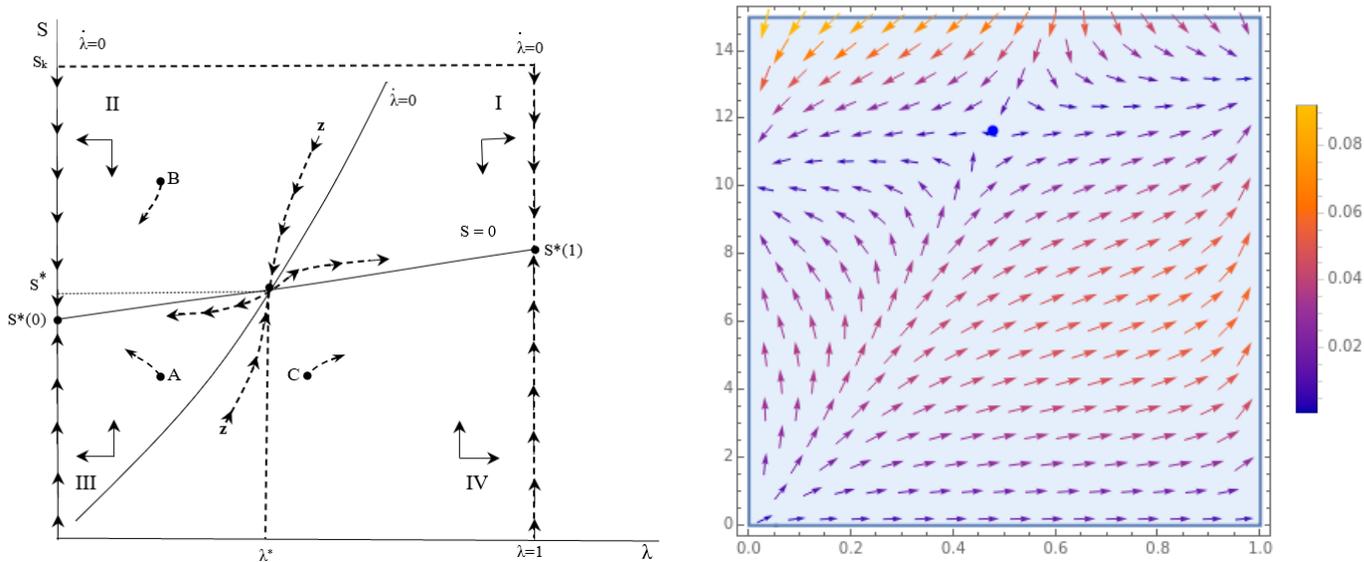
Computadas as condições de existência dos equilíbrios de longo prazo das variáveis de estado, a análise de (in)estabilidade local será realizada por meio de uma expansão de Taylor na vizinhança dos equilíbrios. Nesse sentido, a condição necessária para estabilidade assintótica requer que o determinante da matriz jacobiana, $|J|$ do sistema composto por (14) e (16) seja positivo. Conforme apresentado no Apêndice B, o sinal do determinante, avaliado nos equilíbrios de longo prazo, (S^*, λ^*) , depende de condições

¹⁰ Dada a complexidade das expressões algébricas e para manter o foco na intuição analítica do modelo, optamos por mover as derivações matemáticas corespondentes para os apêndices.

paramétricas específicas que resulta em duas configurações economicamente plausíveis. Dadas as condições naturais de regeneração, r , e suporte, S_k , do recurso ambiental, quanto maior o benefício marginal da extração, $(x_{nc} - x_c)\alpha$, maior será a chance de coexistência das estratégias de cooperação e não cooperação no equilíbrio de longo prazo ($|J| > 0$), ou seja, o equilíbrio polimórfico ser estável.¹¹ Por outro lado, se o efeito marginal dos custos sociais subjetivos, $\phi(x_{nc} - x_c) + \gamma$, for relativamente grande, o determinante será negativo e a dinâmica de longo prazo será instável (do tipo ponto de sela), com a sobrevivência assintótica de apenas uma das estratégias individuais o equilíbrio polimórfico é instável. A seguir, examinamos qualitativamente cada um dos casos e suas implicações para a literatura.

A Figura 1 apresenta uma ilustração qualitativa do ponto de sela no painel (a) e uma simulação para valores plausíveis dos parâmetros do sistema no painel (b). Se as condições iniciais forem tais que o sistema socioecológico se encontre em qualquer ponto do ramo estável da sela (a separatriz ZZ), as variáveis de estado convergem assintoticamente para seus valores de equilíbrio de longo prazo. Entretanto, a condição de coexistência das estratégias de cooperação e não cooperação é instável. Qualquer perturbação exógena faz com que o sistema eventualmente convirja para uma situação em que todos cooperam $\lambda^* = 1$ ou não cooperam $\lambda^* = 0$. Consequentemente, o estoque do recurso natural eventualmente alcança seu nível eficiente, $S^*(1)$, ou ineficiente, $S^*(0)$, respectivamente.

Figura 1 – Representação do ponto de sela do sistema socioecológico



(a) Equilíbrio no ponto de sela.

(b) Simulação do campo vetorial.

Nota: O painel (a) apresenta uma representação ilustrativa do ponto de sela do sistema. O painel (b) apresenta uma simulação do campo vetorial que governa o relacionamento instável entre a fração de cooperadores (eixo x) e o estoque do recurso natural (eixo y). Os parâmetros economicamente plausíveis utilizados na simulação foram os seguintes: $x_c = 0.1$, $x_{nc} = 0.3$, $\alpha = 0.022$, $\delta = 0.2$, $\gamma = 0.08$, $\phi = 0.003$, $\sigma = 0.05$, $r = 0.02$, $K = 15$.

Considere que o sistema socioecológico inicie próximo ao ponto A, no quadrante III da Figura 1 (painel a). Nessa região, o estoque do recurso natural está em um nível relativamente baixo e distante da sua capacidade máxima de suporte, de tal forma que S_t está subindo. Como a fração de cooperadores é relativamente baixa, os custos pecuniários e subjetivos são tais que desincentivam a cooperação, λ_t está caindo. Note que, *coeteris paribus*, um λ_t relativamente pequeno tem três efeitos diretos no modelo. Reduz a probabilidade de um indivíduo não cooperador ser detectado pelo monitoramento social, reduz os custos subjetivos de culpa e vergonha ao passo que aumenta a desutilidade de punir. O sistema eventualmente

¹¹ Como discutido mais abaixo, a estabilidade assintótica requer que o traço da matriz jacobiana seja negativo.

converge para $\lambda^* = 0$ e $S^*(0)$. Considere agora que o sistema inicie em uma região próximo ao ponto B , no quadrante II da [Figura 1](#) (painel a). Nesse ponto, o estoque do recurso natural é relativamente alto e está mais próximo da sua capacidade máxima de suporte. Assim, S_t está caindo, reduzindo o benefício da extração para cooperadores e não cooperadores nas proporções, $\lambda_t x_c$ e $(1 - \lambda_t)x_{nc}$, respectivamente. Como $x_{nc} > x_c$, quando a fração de cooperadores é relativamente pequena, o benefício da extração cai proporcionalmente mais para os cooperadores. Assim como em A , um λ_t relativamente pequeno não cria incentivos pecuniários e pressões morais fortes o suficiente para induzir a cooperação. O sistema eventualmente converge para um equilíbrio caracterizado pela ausência de cooperação e ineficiência máxima na extração do recurso natural.

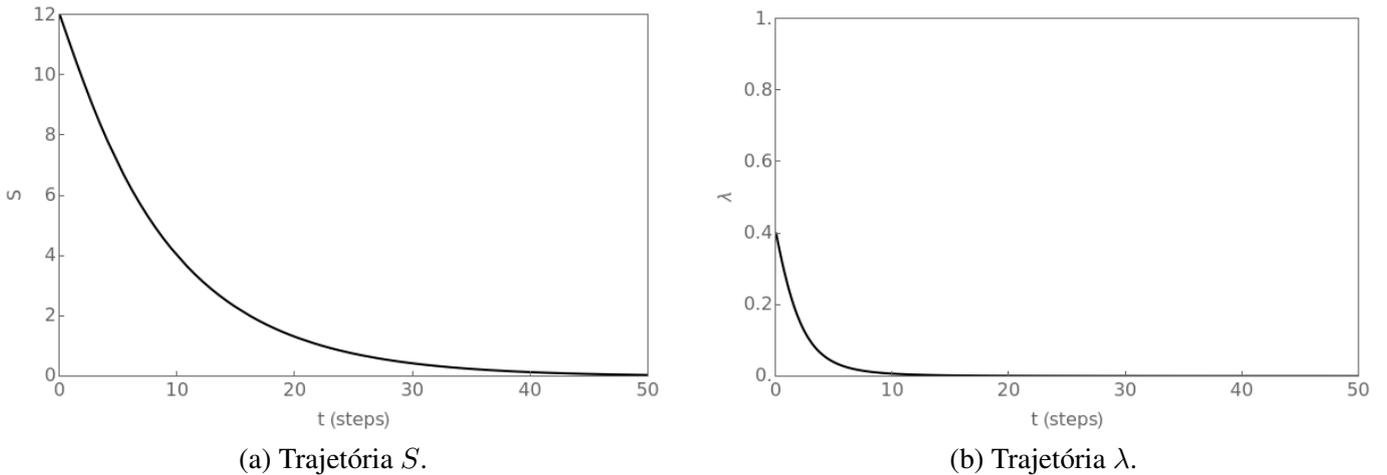
Em ambos os pontos A e B o problema de interação estratégica é caracterizado pela ausência de um número suficientemente grande de indivíduos que agem em conformidade com a norma social definida pela comunidade. Toda a região à esquerda do ramo estável, ZZ , é caracterizada por fortes pressões evolucionárias que desestimulam a cooperação. Assim, deixado ao livre jogo das suas características institucionais, a cooperação pode nunca emergir como uma solução evolucionariamente estável. O sistema precisa de um estímulo exógeno em λ_t para que passe a operar à direita da separatriz ZZ . Imagine que o sistema inicia próximo ao ponto A e recebe um impulso exógeno que aumenta a proporção de cooperadores para um ponto próximo a C , no quadrante IV da [Figura 1](#) (painel a). Nessa região, um λ_t suficientemente grande aumenta a probabilidade de detecção dos não cooperadores e eleva seus custos intrínsecos associados ao sentimento de culpa e vergonha. Como a fração de não cooperadores é relativamente menor, a desutilidade da punição associada ao monitoramento também é menor. Em conjunto, ambos os efeitos criam uma pressão evolucionária para que os indivíduos ajam em conformidade com as normas sociais. Nesse caso, o estoque do recurso natural eventualmente convergirá para o nível de extração eficiente, $S^*(1)$.

O tamanho da região em que as pressões evolucionárias desestimulam a cooperação pode ser afetada por parâmetros estruturais e comportamentais do modelo. Computamos formalmente no Apêndice (C.5) como os principais parâmetros do modelo afetam, *coeteris paribus*, o equilíbrio instável do sistema. Ao afetar tanto o intercepto quanto a inclinação da isóclina $\dot{\lambda}_t = 0$, uma elevação em γ aumenta o tamanho da região de não cooperação. Ou seja, a elevação da desutilidade associada ao ato de punir após o monitoramento social cria uma pressão que desestimula a cooperação. Ao seu turno, elevações no custo pecuniário, σ , e de culpa e vergonha, ϕ , dos não cooperadores reduzem o tamanho da região de não cooperação. Pressões evolucionárias para não cooperação tornam-se menores na presença de custos pecuniários e subjetivos relativamente maiores. Essas respostas comportamentais previstas pelo modelo ilustram formalmente a interpretação empírica de que mecanismos objetivos e subjetivos relacionados à punição desempenham um papel crucial na sustentação da cooperação ([FEHR; GACHTER, 2000](#)).

Um caso particular na literatura de recursos comuns é a possibilidade de exaustão do recurso natural ([BRANDER; TAYLOR, 1998](#)). Na presente configuração de longo prazo, a exaustão pode emergir quando a eficiência de extração dos não cooperadores, representado por αx_{nc} , for suficientemente grande e a taxa de renovação dos recursos naturais, dada por r , é suficientemente pequena. A [Figura 2](#) ilustra essa configuração paramétrica. Nesse cenário, o sistema converge assintoticamente para uma situação de catástrofe, em que $S^* = 0$ em conjunto com o fim da cooperação na comunidade, i.e., $\lambda = 0$. Para valores razoáveis dos parâmetros, essa situação é simulada nos painéis (a) e (b). A ocorrência de exaustão dos recursos naturais nessas condições não é um resultado inesperado, uma vez que, além da conformidade com regras impostas pela comunidade, a literatura empírica reconhece amplamente que mudanças tecnológicas na eficiência da extração podem levar a exaustão do recurso natural ([OSTROM, 2000](#)).

A introdução de normas sociais e monitoramento neste jogo evolucionário de CPR ilustra um resultado

Figura 2 – Exaustão do recurso natural



Nota: Os parâmetros economicamente plausíveis utilizados na simulação foram os seguintes: $x_c = 0.1$, $x_{nc} = 0.2$, $\alpha = 0.5$, $\delta = 0.2$, $\gamma = 0.08$, $\phi = 0.03$, $\sigma = 0.05$, $r = 0.01$, $K = 15$.

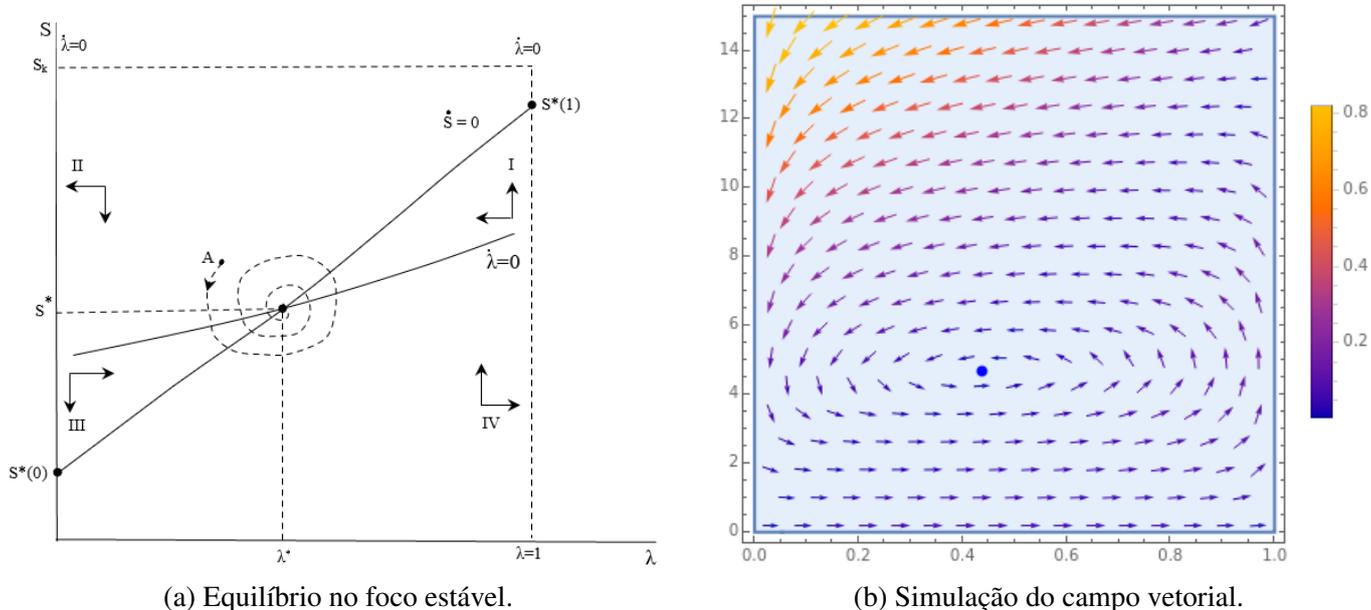
importante. Elementos sociais e individuais relacionados à conformidade com uma norma social só criam efeitos de transbordamento positivos se o número de indivíduos que seguem a norma for suficientemente grande. Em outras palavras, os retornos crescentes da cooperação só são apropriados a partir de determinado limiar. Esse resultado teórico subsidia padrões comportamentais previamente reportados por experimentos de campo. Ao comparar diversos experimentos em comunidades de CPR e experimentos em laboratório, [Ostrom \(2000\)](#) observou que grande parte dos membros das comunidades escolhiam a estratégia de cooperação apenas se estimassem que uma proporção suficiente dos outros envolvidos também agiria da mesma forma. Verificar que os outros estavam dispostos a cooperar aumentava a disposição individual para a cooperação, permitindo que um equilíbrio eficiente fosse alcançado. De maneira mais ampla, estudos empíricos e experimentais mostram que as pessoas levam em conta o que os outros fazem (normas descritivas) como uma referência para identificar quais comportamentos são socialmente aprovados e, portanto, devem ser reproduzidos ([FARROW; GROLLEAU; IBANEZ, 2017](#)).

Uma outra regularidade empírica e experimental envolve a coexistência das estratégias de cooperação e não cooperação no longo prazo ([FERRARO; AGRAWAL, 2021](#); [MELO; PIAGGIO, 2015](#)). Nosso modelo ilustra essa possibilidade quando o benefício marginal de extração, *coeteris paribus*, for relativamente grande (Apêndice B). Nesse caso, o determinante da matriz jacobiana do sistema dinâmico composto por (14) e (16), quando avaliado nos valores do equilíbrio polimórfico de longo prazo (S^* , λ^*), é positivo. Como resultado, a trajetória é assintoticamente estável quando o traço da mesma matriz jacobiana é negativo. Isso requer que a magnitude absoluta da resposta negativa da dinâmica de recursos naturais a uma mudança em S (que apresenta um efeito estabilizador) seja maior do que a magnitude da resposta positiva da dinâmica evolucionária em relação a uma alteração na proporção de cooperadores (o que tem um efeito desestabilizador).

A [Figura 3](#) apresenta essa configuração de estabilidade pelo diagrama de fase, no painel (a), e pela simulação do campo vetorial do sistema na vizinhança do equilíbrio, no painel (b). Suponha que o estoque do recurso natural comece em um ponto $S_0 = S^*(\lambda_t)$, ou seja, S_0 está na isóclina $\dot{S}_t = 0$. Um aumento relativo em S_t , dado que S_t está acima da isóclina $\dot{S}_t = 0$, leva a maiores incentivos à extração, enquanto a capacidade de renovação dos recursos naturais é limitada. Isso faz com que o impacto marginal de S_t seja mais intenso na função de extração do que na função de renovação. Por consequência, o estoque do recurso natural decresce até retornar para a isóclina. Esse movimento é indicado pelas setas que apontam para baixo

na região *II* e *III* da Figura 3. De maneira análoga, caso ocorra uma variação negativa em S , há um estoque menor disponível para a extração, fazendo com que o ritmo de extração seja menor do que a capacidade de renovação. Tal combinação resulta em um aumento no estoque do recurso natural disponível, fazendo com que ele retorne para a direção da isóclina $\dot{S}_t = 0$. Tal movimento é representado pelas setas apontando para cima nas regiões *I* e *IV* da Figura 3.

Figura 3 – Representação do foco estável do sistema socioecológico



Nota: O painel (a) apresenta uma representação ilustrativa do foco estável do sistema. O painel (b) apresenta uma simulação do campo vetorial que governa o relacionamento cíclico entre a fração de cooperadores (eixo x) e o estoque do recurso natural (eixo y). Os parâmetros economicamente plausíveis utilizados na simulação foram os seguintes: $x_c = 0.1$, $x_{nc} = 1.15$, $\alpha = 0.05$, $\delta = 0.2$, $\gamma = 0.03$, $\phi = 0.001$, $\sigma = 0.05$, $r = 0.05$, $K = 15$.

Em $\dot{\lambda}_t = 0$, o impacto de uma pequena mudança em λ_t sobre $\dot{\lambda}_t$ é positivo. Para analisar essa dinâmica, podemos traçar três isóclinas que apresentam $\dot{\lambda}_t = 0$. Duas verticais, uma para $\lambda^* = 0$ e outra para $\lambda^* = 1$ e uma última, positivamente inclinada no plano (λ_t, S_t) , para $\lambda_t = \lambda^*$. No equilíbrio polimórfico, quando $\lambda_t = \lambda^*$, temos que os *payoffs* de cooperar e não cooperar são equivalentes, $\pi_c - \pi_{nc} = 0$, fazendo com que $\dot{\lambda}_t = 0$. Logo, sempre que λ_t inicia à esquerda de $\dot{\lambda}_t = 0$, temos que $\pi_c - \pi_{nc} < 0$, causando uma tendência de redução da cooperação, tendo em vista o diferencial de *payoffs*, fazendo com que $\dot{\lambda}_t < 0$. Esse comportamento é representado pelas setas apontando para a esquerda nas regiões *I* e *II* da Figura 3. Analogamente, quando a trajetória de λ_t inicia à direita de $\dot{\lambda}_t = 0$, $\pi_c - \pi_{nc} > 0$ e $\dot{\lambda}_t > 0$, indicando uma tendência de aumento na parcela de cooperadores na comunidade. Essa relação é representada pelas setas apontando para a direita nas regiões *III* e *IV* na Figura 3. O equilíbrio $(\lambda^*, S^*(\lambda^*))$ é um foco estável, conforme demonstrado no Apêndice B, enquanto os equilíbrios $(0, S^*(0))$ e $(1, S^*(1))$ são repulsores locais. O equilíbrio polimórfico é caracterizado por trajetórias anti-horárias que fluem em direção a ele. Ele é decorrente do posicionamento das curvas que, cada uma, por vez, bloqueia a linha de fluxo que corre na direção prescrita, fazendo com que a linha de fluxo seja obrigada a cruzar de uma região para a outra em um formato espiral, conforme indicado pela linha pontilhada na Figura 3.

Considere que o sistema socioecológico inicie em um ponto próximo a *A*, no quadrante *II* da Figura 3, em que o número de cooperadores é relativamente baixo e o estoque do recurso natural relativamente alto. Nessa região, a desutilidade dos cooperadores relacionada ao ato de punir, dada por $\gamma(1 - \lambda_t)$, é relativamente alta. Por outro lado, o custo pecuniário e social esperado, representado por $\lambda_t[(x_{nc} - x_c)\phi + \sigma]$ é relativamente

pequeno. Note que além da probabilidade de um não cooperador ser pego por meio do monitoramento ser menor, a proporção relativamente baixa de cooperadores reduz o sentimento de culpa e vergonha derivado da escolha de não seguir a norma social. A dinâmica evolucionária acaba desestimulando a cooperação. Ademais, com uma proporção relativamente alta de não cooperadores, o estoque do recurso natural está caindo, afetando o produto médio do esforço, αS_t , o sistema eventualmente ingressa na região *III*. Nessa região, o estoque de recurso natural ainda está caindo, porém ocorre uma mudança na composição das populações de cooperadores e não cooperadores. Conforme o estoque do recurso natural diminui, há queda no produto médio por unidade do esforço de ambos, cooperadores e não cooperadores. A queda do produto médio por unidade de esforço é maior entre os não cooperadores, pois eles exploram mais. Portanto, em algum momento, na margem, torna-se vantajoso cooperar.

À medida que o número de cooperadores aumenta, menos intensa será a atividade de extração, fazendo com que a queda no estoque do recurso natural seja interrompida e a linha de fluxo siga para a região *IV* da [Figura 3](#). Nesta região, inicia-se uma trajetória crescente do estoque do recurso natural, motivada pelo aumento na proporção de cooperadores. A elevação de λ_t aumenta o custo subjetivo de culpa e vergonha do não cooperador ao escolher não seguir a norma social, ao mesmo tempo em que eleva a probabilidade de ser pego pelo monitoramento social. Por outro lado, os cooperadores enfrentam uma desutilidade relativamente menor ao punir. Logo, comparativamente, há maiores custos esperados de não cooperar e as pressões evolucionárias estimulam ainda mais a cooperação. O aumento do estoque do recurso natural se mantém na passagem da região *IV* para a região *I*. Entretanto, a elevação no produto médio por unidade de esforço leva a uma queda na fração de cooperadores, já que benefício adicional passa a compensar para alguns indivíduos o risco de infringir as normas sociais determinadas pela comunidade. O sistema ingressa novamente na região *II*, eventualmente convergindo assintoticamente para (λ^*, S^*) .

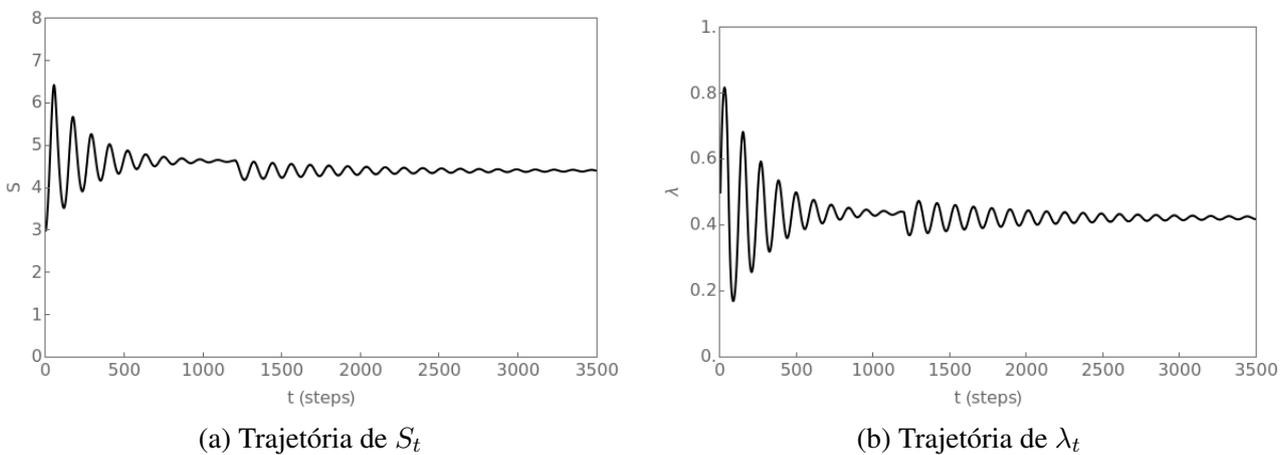
Esse comportamento cíclico cria períodos de expansão e contração do estoque do recurso natural. Um resultado semelhante é encontrado por [Brander e Taylor \(1998\)](#). O estudo utiliza um modelo ricardiano com uma estrutura de mercado e outros mecanismos inerentes. O processo de ciclo em ambos depende de condições particulares na interação entre a população e o recurso natural. Enquanto em [Brander e Taylor \(1998\)](#) a dinâmica cíclica está ligada à variação populacional como resposta a mudanças no recurso natural, nosso modelo sugere que mesmo em uma população fixa o ciclo ocorre ao considerar a interação estratégica entre cooperadores e não cooperadores. No primeiro a trajetória cíclica requer que a fertilidade seja muito responsiva ao consumo per capita de recursos naturais e no segundo o ciclo ocorre quando o benefício marginal em extração supere o efeito marginal dos custos sociais intrínsecos. Apesar das diferenças metodológicas entre os modelos, a exaustão dos recursos naturais em ambos tem origem em um conjunto de condições semelhantes. Em [Brander e Taylor \(1998\)](#), se a taxa de crescimento populacional superar a capacidade de regeneração, o sistema pode colapsar para um $S = 0$. De maneira análoga, em nosso modelo a condição de esgotamento exige que a eficiência de extração dos não cooperadores seja suficientemente alta em relação à taxa de renovação dos recursos naturais. Em ambos a tecnologia de extração também exerce um papel determinante para o esgotamento dos recursos naturais.

A contribuição de [Sethi e Somanathan \(1996\)](#) também encontra múltiplos equilíbrios que podem ser estáveis ou instáveis, dependendo da configuração paramétrica adotada. No entanto, o padrão de flutuação cíclica observado em nosso modelo diferencia-se significativamente do padrão obtido por [Sethi e Somanathan \(1996\)](#) devido ao tratamento endógeno dos custos pecuniários e subjetivos em uma estrutura de monitoramento social, bem como a modelagem explícita da dinâmica dos recursos naturais. Esta distinção permite uma análise detalhada e complexa da interação entre cooperadores e não cooperadores, revelando

ciclos estáveis que demonstram a coexistência dinâmica entre as subpopulações e os recursos naturais. Enquanto [Sethi e Somanathan \(1996\)](#) obtêm equilíbrios fixos em uma estrutura que modela os custos de maneira direta, nosso modelo capta a dualidade dos efeitos dos custos intrínsecos e a endogeneidade das flutuações do recurso comum.

Assim como no cenário instável, representado pela Figura 1, exploramos como o sistema socioecológico responde a variações exógenas nos parâmetros estruturais e comportamentais do modelo. No longo prazo, essa resposta tem implicações importantes para o desenho de incentivos ou mudança institucional que sustente a cooperação e o estoque do recurso natural em níveis mais elevados. Primeiro, considere uma elevação exógena em γ , que mede a desutilidade dos cooperadores ao ter que punir um não cooperador ([Figura 4](#)). Note que uma elevação em γ reduz os valores do equilíbrio polimórfico S^* e λ^* , mas não altera intensidade das flutuações cíclicas. A elevação da desutilidade associada ao ato de punir desestimula a cooperação, o que, por sua vez, estimula o aumento da fração de não cooperadores e assim da taxa de extração do recurso comum. Como γ é um parâmetro-chave que determina a estabilidade do foco estável uma elevação suficientemente alta pode inviabilizar a coexistência evolucionária de cooperadores e não cooperadores na gestão do recurso comum. A literatura categoriza esse tipo de configuração na classe dos problemas de bens públicos de segunda ordem: todos se beneficiam da punição dos não cooperadores, mas se a punição for muito custosa quase ninguém terá o incentivo para punir os não cooperadores ([FEHR; GACHTER, 2002](#)). Esse resultado teórico se alinha a uma literatura empírica que destaca a importância da redução dos custos de monitoramento e punição, por meio do uso da tecnologia, por exemplo, para a elevação dos níveis de conformidade com uma determinada norma social ([OSTROM, 2000; AUER, 2006; DANIELSEN et al., 2022; PIERSKALLA; HOLLENBACH, 2013](#)).

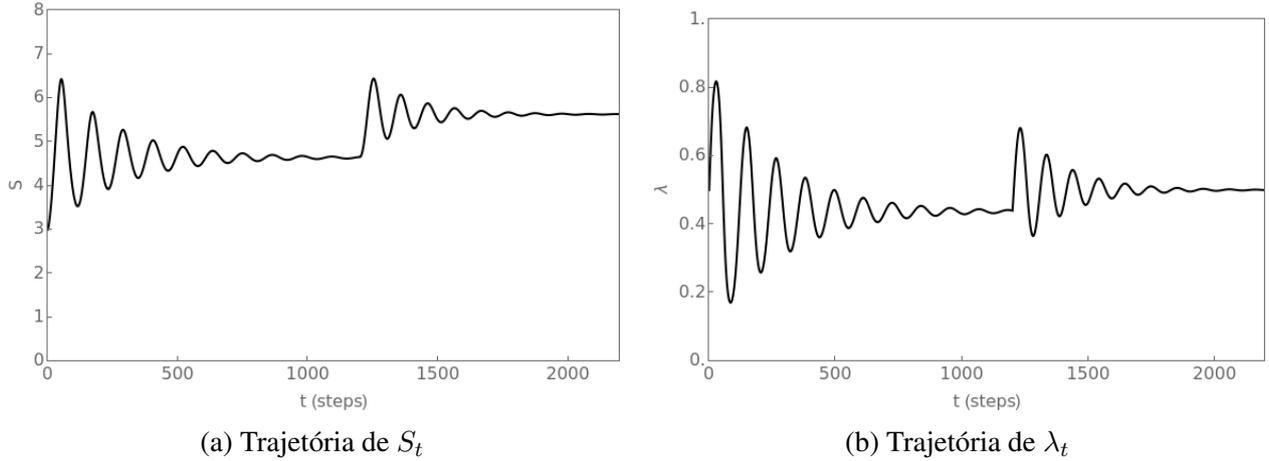
Figura 4 – Resposta do sistema socioecológico a uma variação exógena em γ



Nota: Os parâmetros economicamente plausíveis utilizados na simulação foram os seguintes: $x_c = 0.1$, $x_{nc} = 1.15$, $\alpha = 0.05$, $\delta = 0.2$, $\gamma = 0.03$, $\phi = 0.001$, $\sigma = 0.05$, $r = 0.05$, $K = 15$. Considere uma variação positiva em γ a partir de 1200 passos.

O efeito das sanções pode ser investigado por meio de variações nos parâmetros de custo pecuniário e subjetivo apresentados na [Figura 5](#) e na [Figura 6](#), respectivamente. Mesmo que estes sejam mecanismos distintos, ambos exercem um impacto semelhante na trajetória de S_t e λ_t . Dada uma variação exógena positiva em σ ou γ , o equilíbrio de longo prazo é caracterizado por uma maior proporção de indivíduos que seguem a norma social, dado que o seu aumento faz com que a estratégia de não cooperação torne-se mais custosa. A ampliação da cooperação leva a um aumento no estoque de recursos naturais, tendo em vista que o nível de extração dos cooperadores respeita o ritmo de renovação, ditado por r . É interessante observar que tanto o padrão de flutuação quanto a os valores de longo prazo do equilíbrio polimórfico são

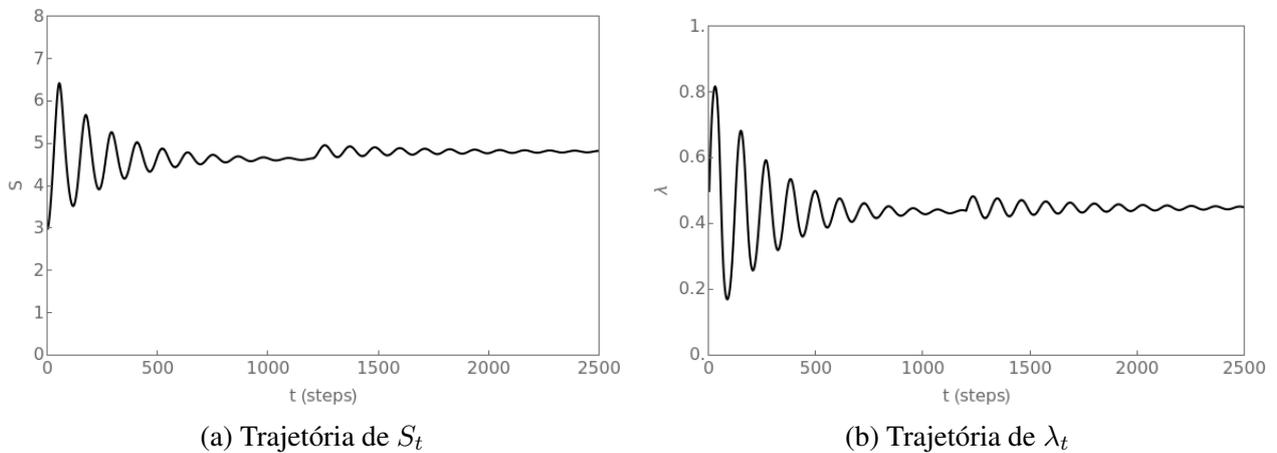
Figura 5 – Resposta do sistema socioecológico a uma variação em σ



Nota: Os parâmetros economicamente plausíveis utilizados na simulação foram os seguintes: $x_c = 0.1$, $x_{nc} = 1.15$, $\alpha = 0.05$, $\delta = 0.2$, $\gamma = 0.03$, $\phi = 0.001$, $\sigma = 0.05$, $r = 0.05$, $K = 15$. Considere uma variação positiva em σ a partir de 1200 passos.

maiores em resposta a uma variação no custo pecuniário, σ , do que em resposta a uma variação exógena na suscetibilidade dos não cooperadores ao sentimento de culpa e vergonha. Entretanto, note também que a existência de elementos subjetivos associados aos sentimentos de culpa e vergonha é essencial para a coexistência evolucionária das estratégias de cooperação e não cooperação, já que afetam as condições de estabilidade do sistema socioecológico. O mesmo não ocorre para o custo pecuniário, uma vez que a estabilidade do sistema independe de σ (Apêndice B).

Figura 6 – Resposta do sistema socioecológico a uma variação em ϕ



Nota: Os parâmetros economicamente plausíveis utilizados na simulação foram os seguintes: $x_c = 0.1$, $x_{nc} = 1.15$, $\alpha = 0.05$, $\delta = 0.2$, $\gamma = 0.03$, $\phi = 0.001$, $\sigma = 0.05$, $r = 0.05$, $K = 15$. Considere uma variação positiva em ϕ a partir de 1200 passos.

A resposta positiva do sistema dado um aumento nos custos pecuniários se alinha com resultados encontrados pela literatura empírica no estudo de um sistema de irrigação no Nepal, onde comportamentos dispendiosos de monitorização e sanção eram utilizados para aumentar a adesão da comunidade as regras (BENJAMIN et al., 1994). Posteriormente, esses resultados foram testados e validados por meio de experimentos em um ambiente controlado de laboratório (OSTROM, 2006).

A complementaridade entre os elementos morais e pecuniários na gestão de sistemas socioecológicos, tal como demonstrado no modelo, encontra respaldo na literatura empírica. Elementos subjetivos e aspectos morais levaram a uma redução de 44% na extração de recursos em uma comunidade rural na Colômbia, em

comparação com o nível que maximizaria os ganhos individuais (CARDENAS, 2004). Mesmo sem considerar os incentivos pecuniários, a estabilidade da cooperação nessas comunidades já estavam estabelecidas por meio de elementos subjetivos firmados pelas normas sociais. Ademais, esse experimento ainda verifica como a introdução de uma multa resultou em uma redução ainda maior na extração, indicando que os incentivos pecuniários podem reforçar os comportamentos desejáveis preexistentes, diminuindo ainda mais os níveis de exploração do recurso. Tal resultado corrobora a previsão do modelo segundo a qual elementos pecuniários, como multas, podem atuar de forma complementar às normas sociais, amplificando a eficácia das preferências sociais já estabelecidas (CARDENAS, 2004).

4 Conclusão

Diante dos desafios globais, como mudanças climáticas e perda de biodiversidade, problemas de ação coletiva se tornam evidentes. Entre as diversas abordagens para a gestão dos bens comuns, destaca-se o papel crucial do framework institucional. A literatura experimental recente relacionada a essa abordagem sugere que a capacidade de uma comunidade realizar o monitoramento social, bem como a punição associada a custos pecuniários e sociais (individuais e subjetivos), como os sentimentos de culpa e a vergonha, adicionam uma nova camada de complexidade aos elementos econômicos tradicionais envolvidos na gestão de um recurso comum. O objetivo deste estudo foi modelar a influência desse ambiente institucional em um jogo evolucionário de CPR.

O modelo avança em relação a literatura convencional de jogos de CPR em pelo menos duas dimensões analíticas importantes. Primeiro, considera o papel de elementos individuais envolvidos no cumprimento de uma norma social, amplamente documentados pela literatura experimental, para a autogovernança eficiente. E segundo, ao construir uma estrutura analítica baseada na teoria dos jogos evolucionários, modela um ambiente institucional relativamente mais próximo a dinâmica real dos sistemas socioecológicos, caracterizados por indivíduos que possuem racionalidade limitada e tomam decisões com base em informação local.

Para valores razoáveis dos parâmetros, mostramos que a relação entre o estoque do recurso natural e a massa de indivíduos que cooperam com sua autogovernança eficiente apresenta duas configurações possíveis no longo prazo. Se o benefício marginal de extração for relativamente mais alto do que o efeito dos custos sociais subjetivos no *payoff* dos cooperadores e não cooperadores, o sistema socioecológico é caracterizado por um equilíbrio polimórfico estável, em que a massa de cooperadores e o estoque do recurso natural evoluem ciclicamente. Por outro lado, se o efeito dos custos sociais subjetivos for suficientemente alto, a dinâmica é caracterizada por um ponto de sela, em que a estratégia cooperar emerge como uma solução evolucionariamente estável apenas se o sistema socioecológico contar com uma fração suficientemente alta de membros que agem em conformidade com as normas sociais. Como as evidências são amplas e diversas, ambas as configurações de longo prazo do modelo subsidiam, *mutatis mutandis*, padrões comportamentais observados em pesquisas de campo. Em especial, regularidades empíricas discutidas por Elinor Ostrom, como a coexistência entre cooperadores e não cooperadores nas comunidades de common pool e a existência de um limiar para a apropriação dos retornos crescentes da cooperação, são resultados centrais do modelo.

Para cada uma dessas configurações de longo prazo, exploramos como o sistema socioecológico pode sustentar um equilíbrio cooperativo de longo prazo em que o estoque do recurso natural esteja mais próximo do seu nível socialmente eficiente. Mais uma vez, os padrões teóricos previstos pelo modelo estão em linha com as evidências empíricas e experimentais da literatura de recursos comuns. Um resultado conhecido que o modelo ilustra é que a elevação da punição pecuniária eleva as taxas de conformidade. No caso dos

custos sociais subjetivos, mudanças institucionais ou *nudges* comportamentais que reduzam a desutilidade associada ao ato de punir os não cooperadores ou aumentem a suscetibilidade individual aos sentimentos de culpa e vergonha, estimulam a cooperação. O impacto marginal do custo pecuniário sobre o estoque do recurso natural no longo prazo é superior ao impacto dos elementos subjetivos. Contudo, os elementos sociais e individuais relacionados ao cumprimento da norma social representam condições necessárias para a emergência de um equilíbrio cooperativo evolucionariamente estável no modelo. Em outras palavras, os custos pecuniários não representam condições suficientes para a emergência da autogovernança eficiente.

Nesse contexto, ao destacar o papel dos elementos sociais e individuais de conformidade com normas sociais, a estrutura analítica baseada na teoria de jogos evolucionários modelada nesta pesquisa abre um importante agenda para pesquisas futuras. Em especial, um caminho promissor envolve a modelagem de elementos morais mais amplos a partir de dinâmicas de longo prazo mais ricas, como a dinâmica evolucionário do tipo *satisficing*, que permite a modelagem de aspectos comportamentais menos tangíveis sem a necessidade de formas funcionais mais restritivas.

Referências

ACHESON, J. M. The Lobster Gangs of Maine. [S.l.]: University Press of New England, 1988.

ANDERIES, J. M. et al. The challenge of understanding decisions in experimental studies of common pool resource governance. Ecological Economics, v. 70, n. 9, p. 1571–1579, 2011. Special Section - Governing the Commons: Learning from Field and Laboratory Experiments. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800911000188>>.

AUER, M. Contexts, multiple methods, and values in the study of common-pool resources. Journal of Policy Analysis and Management, [Wiley, Association for Public Policy Analysis and Management], v. 25, n. 1, p. 215–227, 2006. ISSN 02768739, 15206688. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/30162708>>.

BENJAMIN, P. et al. Institutions, incentives and irrigation in Nepal. [S.l.]: Workshop in Political Theory and Policy Analysis, 1994.

BICCHIERI, C. et al. Social norms and behavior change: The interdisciplinary research frontier. Journal of Economic Behavior Organization, v. 205, p. A4–A7, 2023. ISSN 0167-2681. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167268122004115>>.

BOWLES, S. Microeconomics: Behavior, Institutions, and Evolution. [S.l.]: Princeton University Press, 2004. ISBN 9780691091631.

BOWLES, S.; GINTIS, H. The evolution of strong reciprocity: cooperation in heterogeneous populations. Theoretical Population Biology, v. 65, n. 1, p. 17–28, 2004.

BOWLES, S.; GINTIS, H. A Cooperative Species: Human Reciprocity and Its Evolution. [S.l.]: Princeton University Press, 2011.

BRANDER, J. A.; TAYLOR, M. S. The simple economics of easter island: A ricardo-malthus model of renewable resource use. The American Economic Review, American Economic Association, v. 88, n. 1, p. 119–138, 1998. ISSN 00028282.

BROFELDT, S. et al. Community monitoring of carbon stocks for redd+: Does accuracy and cost change over time? Forests, v. 5, n. 8, p. 1834–1854, 2014.

- BUTERA, L. et al. Measuring the welfare effects of shame and pride. American Economic Review, v. 112, n. 1, p. 122–68, January 2022.
- CARDENAS, J.-C. Norms from outside and from inside: an experimental analysis on the governance of local ecosystems. Forest Policy and Economics, v. 6, n. 3, p. 229–241, 2004. Economics of Sustainable Forest Management.
- CARPIO, M. B. D.; ALPIZAR, F.; FERRARO, P. J. Community-based monitoring to facilitate water management by local institutions in costa rica. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 118, n. 29, p. e2015177118, 2021.
- COLEMAN, J. S. Foundations of social theory. [S.l.]: Harvard University Press, 1990.
- CRAWFORD, S. E. S.; OSTROM, E. A grammar of institutions. The American Political Science Review, [American Political Science Association, Cambridge University Press], v. 89, n. 3, p. 582–600, 1995.
- DANIELSEN, F. et al. Community monitoring of natural resource systems and the environment. Annual Review of Environment and Resources, v. 47, 10 2022.
- DASGUPTA, P.; MÄLER, K.-G. The Environment and Emerging Development Issues. Oxford, UK: Clarendon Press Oxford, 1997. v. 2.
- DASGUPTA, P. S.; HEAL, G. M. Economic Theory and Exhaustible Resources. [S.l.]: Cambridge University Press, 1980. (Cambridge Economic Handbooks).
- DIETZ, T.; OSTROM, E.; STERN, P. C. The struggle to govern the commons. Science, v. 302, n. 5652, p. 1907–1912, 2003.
- DIXIT, A.; LEVIN, S. A.; RUBENSTEIN, D. I. Reciprocal insurance among kenyan pastoralists. Theoretical Ecology, v. 6, p. 173 – 187, 2012.
- EISENBARTH, S.; GRAHAM, L.; RIGTERINK, A. S. Can community monitoring save the commons? evidence on forest use and displacement. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 118, n. 29, p. e2015172118, 2021.
- FARROW, K.; GROLLEAU, G.; IBANEZ, L. Social norms and pro-environmental behavior: A review of the evidence. Ecological Economics, v. 140, p. 1–13, 2017.
- FEHR, E.; GACHTER, S. Cooperation and punishment in public goods experiments. American Economic Review, v. 90, n. 4, p. 980–994, September 2000.
- FEHR, E.; GACHTER, S. Altruistic punishment in humans. Nature, v. 415, p. 137–140, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/415137a>>.
- FERRARO, P. J.; AGRAWAL, A. Synthesizing evidence in sustainability science through harmonized experiments: Community monitoring in common pool resources. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 118, n. 29, p. e2106489118, 2021.
- GIBSON, C. C.; WILLIAMS, J. T.; OSTROM, E. Local enforcement and better forests. World Development, v. 33, n. 2, p. 273–284, 2005.
- GINTIS, H. The hitchhiker’s guide to altruism: Gene-culture coevolution, and the internalization of norms. Journal of Theoretical Biology, v. 220, n. 4, p. 407–418, 2003.
- GÜTH, W.; KLIEMT, H. Evolutionarily stable co-operative commitments. Theory and Decision, Springer, v. 49, n. 2, p. 197–222, 2000.

- HARDIN, G. The tragedy of the commons. Science, v. 162, n. 3859, p. 1243–1248, 1968.
- HOFBAUER, J.; SIGMUND, K. Evolutionary Games and Population Dynamics. [S.l.]: Cambridge University Press, 1998.
- LAURENT, E.; OSTROM, E. Des individus rationnels sont-ils désespérément piégés dans des dilemmes sociaux ? L'analyse d'Elinor Ostrom. Annales des mines - Série Responsabilité et environnement, F.F.E., v. 3, n. 79, p. 31 – 35, jul. 2015.
- MARROCOLI, S. et al. Environmental uncertainty and self-monitoring in the commons: A common-pool resource experiment framed around bushmeat hunting in the republic of congo. Ecological Economics, v. 149, p. 274–284, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092180091730616X>>.
- MELO, G. de; PIAGGIO, M. The perils of peer punishment: Evidence from a common pool resource framed field experiment. Ecological Economics, v. 120, p. 376–393, 2015.
- NORTH, D. C. Institutions, Institutional Change and Economic Performance. [S.l.]: Cambridge University Press, 1990.
- OSTROM, E. Governing the commons-The evolution of institutions for collective actions. [S.l.]: Political economy of institutions and decisions, 1990.
- OSTROM, E. Collective action and the evolution of social norms. Journal of Economic Perspectives, v. 14, n. 3, p. 137–158, September 2000.
- OSTROM, E. The value-added of laboratory experiments for the study of institutions and common-pool resources. Journal of Economic Behavior Organization, v. 61, n. 2, p. 149–163, 2006.
- OSTROM, E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science (New York, N.Y.), v. 325, n. 5939, p. 419–422, 2009.
- OSTROM, E.; GARDNER, R.; WALKER, J. Rules, Games, and Common-Pool Resources. [S.l.]: University of Michigan Press, 1994.
- OSTROM, E.; WALKER, J.; GARDNER, R. Covenants with and without a sword: Self-governance is possible. The American Political Science Review, [American Political Science Association, Cambridge University Press], v. 86, n. 2, p. 404–417, 1992.
- PEREZ-TRUGLIA, R.; TROIANO, U. Shaming tax delinquents. Journal of Public Economics, v. 167, p. 120–137, 2018.
- PIERSKALLA, J. H.; HOLLENBACH, F. M. Technology and collective action: The effect of cell phone coverage on political violence in africa. American Political Science Review, v. 107, n. 2, p. 207–224, 2013.
- POSNER, R. A.; RASMUSEN, E. Creating and enforcing norms, with special reference to sanctions1. International Review of Law and Economics, v. 19, n. 3, p. 369–382, 1999.
- POTEETE, A. R.; OSTROM, E.; JANSSEN, M. A. Working Together: Collective Action, the Commons, and Multiple Methods in Practice. [S.l.]: Princeton University Press, 2010.
- ROCKENBACH, B.; MILINSKI, M. The efficient interaction of indirect reciprocity and costly punishment. Nature, v. 444, p. 718–723, 2006.
- RUSTAGI, D.; ENGEL, S.; KOSFELD, M. Conditional cooperation and costly monitoring explain success in forest commons management. Science, v. 330, n. 6006, p. 961–965, 2010.

SCHAEFER, M. B. Some considerations of population dynamics and economics in relation to the management of the commercial marine fisheries. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, v. 14, n. 5, p. 669–681, 1957.

SETHI, R.; SOMANATHAN, E. The evolution of social norms in common property resource use. The American Economic Review, American Economic Association, v. 86, n. 4, p. 766–788, 1996. ISSN 00028282.

SLOUGH, T.; KOPAS, J.; URPELAINEN, J. Satellite-based deforestation alerts with training and incentives for patrolling facilitate community monitoring in the peruvian amazon. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 118, n. 29, p. e2015171118, 2021.

SLOUGH, T. et al. Adoption of community monitoring improves common pool resource management across contexts. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 118, n. 29, p. e2015367118, 2021.

TAYLOR, P. D.; JONKER, L. B. Evolutionary stable strategies and game dynamics. Mathematical Biosciences, v. 40, n. 1, p. 145–156, 1978.

VOLLAN, B.; OSTROM, E. Cooperation and the commons. Science, v. 330, n. 6006, p. 923–924, 2010.

Apêndice A.

Para computar os equilíbrios que ocorrem quando $\dot{S}_t = \frac{dS_t}{dt} = \dot{\lambda}_t = \frac{d\lambda_t}{dt} = 0$ precisamos analisar quais valores de S e λ atendem a essa condição em (14) e (16). É nítido que $\lambda^* = 0$ e $\lambda^* = 1$ satisfazem a condição de $\dot{\lambda}_t = 0$ em (16), sendo eles equilíbrios do sistema. Quando a escolha de ser cooperador ou não cooperador produz o mesmo *payoff* esperado, ou seja, quando $\pi_c - \pi_{nc} = 0$, o sistema alcança um ponto de equilíbrio interno. Nele, ainda existem indivíduos dispostos a mudar suas estratégias, mas o fluxo de saída de ambas as subpopulações será igual. Subtraindo π_{nc} de π_c em (10), temos:

$$\pi_c - \pi_{nc} = (x_c - x_{nc})(\alpha S_t - \delta) + (\sigma - \gamma)(1 - \lambda_t) + \lambda_t[(x_{nc} - x_c)\phi + \sigma]. \quad (\text{A.1})$$

Quando a diferença entre os payoffs for igual a zero, a solução λ^* para (A.1) é o equilíbrio interno, dado pela seguinte expressão:

$$\lambda^*(S^*) = \frac{(x_{nc} - x_c)(\alpha S^* - \delta) + \gamma - \sigma}{(x_{nc} - x_c)\phi + \gamma}. \quad (\text{A.2})$$

As condições para a existência de λ^* estão resumidas na [Tabela 1](#). Elas indicam que a existência de um $\lambda^* \in (0, 1)$ exige que $(x_{nc} - x_c) + \gamma - \sigma$ seja menor do que $\phi(x_{nc} - x_c) + \gamma$. Caso essa restrição não seja respeitada, λ^* não existe no intervalo de variação considerado.

Tabela 1 – Condições para a existência de λ^*

$(x_{nc} - x_c)(\alpha S^* - \delta) + \gamma - \sigma = 0$	$\lambda^* = 0$
$0 < (x_{nc} - x_c)(\alpha S^* - \delta) + \gamma - \sigma < \phi(x_{nc} - x_c) + \gamma$	$\lambda^* \in (0, 1) \subset \mathbb{R}$
$(x_{nc} - x_c)(\alpha S^* - \delta) + \gamma - \sigma = \phi(x_{nc} - x_c) + \gamma$	$\lambda^* = 1$
$(x_{nc} - x_c)(\alpha S^* - \delta) + \gamma - \sigma > \phi(x_{nc} - x_c) + \gamma$	$\nexists \lambda^* \in (0, 1) \subset \mathbb{R}$

Fonte: os autores.

A fim de demonstrar que o sistema está em equilíbrio em cada um dos casos descritos, precisamos identificar para quais valores de S_t a condição $\dot{S}_t = 0$ é satisfeita. Para qualquer $0 < S < S_k$, e, com um

esforço agregado suficiente, a extração pode ser aumentada para igualar a capacidade de regeneração do recurso natural, fazendo com que $\dot{S}_t = 0$. No equilíbrio polimórfico, quando uma parcela da comunidade escolhe cooperar e outra não, o estoque do recurso natural de equilíbrio é:

$$S^*(\lambda^*) = \frac{S_k \{r - \alpha[x_c \lambda^* + x_{nc}(1 - \lambda^*)]\}}{r}. \quad (\text{A.3})$$

Quando todos os membros da comunidade eventualmente escolhem a estratégia de cooperação, $\lambda^* = 1$, o estoque do recurso natural no equilíbrio de longo prazo é dado por:

$$S^*(1) = \frac{S_k(r - \alpha x_c)}{r}. \quad (\text{A.4})$$

Já para o caso no qual os membros dessa comunidade escolhem jogar a estratégia de não cooperação, $\lambda^* = 0$, o estoque do recurso natural de equilíbrio é proporcionalmente mais baixo do que o valor de equilíbrio do caso em que todos cooperam, tendo em vista a diferença no nível de esforço de extração dos cooperadores e não cooperadores, $x_{nc} - x_c > 0$. Portanto, o estoque do recurso natural no equilíbrio de longo prazo no caso em que não há cooperadores pode ser descrito como:

$$S^*(0) = \frac{S_k(r - \alpha x_{nc})}{r}. \quad (\text{A.5})$$

Também podemos computar as equações (A.2) e (A.3) em termos dos parâmetros do sistema:

$$\lambda^* = \frac{x_c S_k \alpha (r - x_{nc} \alpha) + S_k x_{nc} \alpha (-r + x_{nc} \alpha) - x_c r \delta + r(-\gamma + x_{nc} \delta + \sigma)}{-r \gamma + (x_c - x_{nc})(S_k(x_c - x_{nc})\alpha^2 + r\phi)}, \quad (\text{A.6})$$

e

$$S^* = \frac{S_k(-r(\gamma + (-x_c + x_{nc})\phi) + \alpha(x_c^2 \delta + x_{nc}(\sigma + x_{nc}(\delta + \phi))) + x_c(\gamma - \sigma - x_{nc}(2\delta + \phi)))}{-r \gamma + (x_c - x_{nc})(S_k(x_c - x_{nc})\alpha^2 + r\phi)}. \quad (\text{A.7})$$

Apêndice B.

A matriz Jacobiana de derivadas parciais do sistema dinâmico dado pelas expressões (14) e (16) é representada por:

$$\mathbf{J}(\lambda^*, \mathbf{S}^*) = \begin{bmatrix} \lambda^*(1 - \lambda^*)[\phi(x_{nc} - x_c) + \gamma] & -\lambda^*(1 - \lambda^*)(x_{nc} - x_c)\alpha \\ S^*(x_{nc} - x_c)\alpha & -r \frac{S^*}{S_k} \end{bmatrix}, \quad (\text{B.1})$$

sendo:

$$J_{11} \equiv \frac{\partial \dot{\lambda}_t}{\partial \lambda_t} = \lambda^*(1 - \lambda^*)[\phi(x_{nc} - x_c) + \gamma] > 0,$$

$$J_{12} \equiv \frac{\partial \dot{\lambda}_t}{\partial S_t} = -\lambda^*(1 - \lambda^*)(x_{nc} - x_c)\alpha < 0,$$

$$J_{21} \equiv \frac{\partial \dot{S}_t}{\partial \lambda_t} = S^*(x_{nc} - x_c)\alpha > 0,$$

$$J_{22} \equiv \frac{\partial \dot{S}_t}{\partial S_t} = -r \frac{S^*}{S_k} < 0.$$

O determinante da matriz Jacobiana pode ser representado pela seguinte expressão:

$$\det \mathbf{J}(\lambda^*, \mathbf{S}^*) = \lambda_t^*(1 - \lambda_t^*)S^* [a - b], \quad (\text{B.2})$$

sendo $a = S_k(x_{nc} - x_c)^2\alpha^2 > 0$ e $b = ((x_{nc} - x_c)\phi + \gamma)r > 0$. Reorganizando o termo $[a - b]$ da expressão (B.2) e o igualando a zero, temos a seguinte condição:

$$\alpha(x_{nc} - x_c) - \left(\frac{1}{\alpha(x_{nc} - x_c)} \right) \left(\frac{r}{S_k} \right) [(x_{nc} - x_c)\phi + \gamma] = 0. \quad (\text{B.2.a})$$

Essa relação indica que dadas as condições naturais do recurso ambiental, quanto maior o benefício marginal da extração em relação ao efeito dos custos intrínsecos, maior será a probabilidade de coexistência entre cooperadores e não cooperadores. O efeito dos custos intrínsecos exerce um efeito dual: contribuindo para a evolução da cooperação caso haja uma fração suficientemente alta de cooperadores ou levando a erosão das normas sociais quando não há cooperadores suficientes para ratear o custo de monitoramento. O traço da matriz Jacobiana é dado por $J_{11} + J_{22}$, ou seja:

$$\text{tr} \mathbf{J}(\lambda^*, \mathbf{S}^*) = \lambda^*(1 - \lambda^*)((x_{nc} - x_c)\phi + \gamma) - S^* \frac{r}{S_k}. \quad (\text{B.3})$$

Sejam as isóclinas $\dot{\lambda}_t = 0$ e $\dot{S}_t = 0$ definidas, respectivamente, por:

$$(x_c - x_{nc})(\alpha S_t - \delta) + (\sigma - \gamma)(1 - \lambda_t) + \lambda_t((x_{nc} - x_c)\phi + \sigma) = 0, \quad (\text{B.4})$$

$$r - \frac{r}{S_k} S_t - \alpha(x_c \lambda_t + x_{nc}(1 - \lambda_t)) = 0. \quad (\text{B.5})$$

As inclinações das isóclinas apresentadas em (B.4) e (B.5) podem ser descritas, respectivamente, como:

$$\left. \frac{dS_t}{d\lambda_t} \right|_{\dot{\lambda}_t=0} = \frac{(x_{nc} - x_c)\phi + \gamma}{(x_{nc} - x_c)\alpha} > 0, \quad (\text{B.6})$$

$$\left. \frac{dS_t}{d\lambda_t} \right|_{\dot{S}_t=0} = \frac{S_k(x_{nc} - x_c)\alpha}{r} > 0, \quad (\text{B.7})$$

sendo as inclinações estritamente positivas para quaisquer $\phi \in (0, 1) \in \mathbb{R}_+$, $\sigma \in \mathbb{R}_+$, $\gamma \in \mathbb{R}_+^*$, $\alpha \in \mathbb{R}_+$, $S_k \in \mathbb{R}_+$, $r \in \mathbb{R}_+$ e $(x_{nc} - x_c) \in \mathbb{R}_+$.

Supondo que os impactos marginais de S_t e λ_t em $\dot{\lambda}_t$ sejam mais intensos do que em \dot{S}_t de tal forma que $\frac{\partial \dot{\lambda}_t}{\partial \lambda_t} > \frac{\partial \dot{S}_t}{\partial S_t}$ e $\left. \frac{dS_t}{d\lambda_t} \right|_{\dot{\lambda}_t=0} > \left. \frac{dS_t}{d\lambda_t} \right|_{\dot{S}_t=0}$. Ou seja, subtraindo (B.6) de (B.7), temos:

$$\frac{a - b}{r(x_{nc} - x_c)\alpha} < 0, \quad (\text{B.8})$$

o que é válido para $a < b$. Consequentemente, o determinante da matriz Jacobiana é negativo: $\det \mathbf{J}(\lambda^*, \mathbf{S}^*) = \lambda^*(1 - \lambda^*)S^* [a - b] < 0$, para quaisquer $\phi \in (0, 1) \in \mathbb{R}_+$, $\sigma \in \mathbb{R}_+$, $\gamma \in \mathbb{R}_+^*$, $\alpha \in \mathbb{R}_+$, $S_k \in \mathbb{R}_+$, $r \in \mathbb{R}_+$, $(x_{nc} - x_c) \in \mathbb{R}_+$, $\lambda_t \in (0, 1) \in \mathbb{R}_+^*$ e $S_t \in (0, S_k) \in \mathbb{R}_+^*$.

Supondo que os impactos marginais de S_t e λ_t em \dot{S}_t sejam mais intensos do que em $\dot{\lambda}_t$ de tal forma que $\frac{\partial \dot{\lambda}_t}{\partial \lambda_t} < \frac{\partial \dot{S}_t}{\partial S_t}$ e $\left. \frac{dS_t}{d\lambda_t} \right|_{\dot{\lambda}_t=0} < \left. \frac{dS_t}{d\lambda_t} \right|_{\dot{S}_t=0}$. Ou seja, subtraindo (B.6) de (B.7), temos:

$$\frac{a - b}{r(x_{nc} - x_c)\alpha} > 0, \quad (\text{B.9})$$

o que é válido para $a > b$. Consequentemente, o determinante da matriz Jacobiana é positivo: $\det \mathbf{J}(\lambda^*, \mathbf{S}^*) = \lambda^*(1 - \lambda^*)S^* [a - b] > 0$, para quaisquer $\phi \in (0, 1) \in \mathbb{R}_+$, $\sigma \in \mathbb{R}_+$, $\gamma \in \mathbb{R}_+^*$, $\alpha \in \mathbb{R}_+$, $S_k \in \mathbb{R}_+$, $r \in \mathbb{R}_+$, $(x_{nc} - x_c) \in \mathbb{R}_+$, $\lambda_t \in (0, 1) \in \mathbb{R}_+^*$ e $S_t \in (0, S_k) \in \mathbb{R}_+^*$.

A análise formal estabelece que um equilíbrio estável é obtido a partir de um traço negativo, ou seja, $\frac{\partial \lambda_t}{\partial \lambda_t} + \frac{\partial \dot{S}_t}{\partial S_t} < 0$. $\frac{\partial \lambda_t}{\partial \lambda_t}$ é positivo, de forma que impactos marginais na fração de cooperadores sobre a dinâmica do replicador aumenta a proporção de indivíduos cooperando na comunidade, contribuindo para a instabilidade. Já $\frac{\partial \dot{S}_t}{\partial S_t}$ é negativo e contribui para a estabilidade do sistema. Como temos, por suposição, que $\frac{\partial \dot{S}_t}{\partial S_t} > \frac{\partial \lambda_t}{\partial \lambda_t}$, ocorre uma convergência cíclica para o equilíbrio.

Apêndice C.

A fim de avaliar a variação marginal dos parâmetros do modelo no ponto de equilíbrio do sistema, podemos computar as derivadas parciais das isóclinas em relação aos parâmetros. Sejam as isóclinas $\dot{\lambda}_t = 0$ e $\dot{S}_t = 0$ definidas, respectivamente, por (B.4) e (B.5). Isolando S em ambas, temos:

$$S = \frac{\sigma - \gamma - \delta(x_c - x_{nc})}{\alpha(x_{nc} - x_c)} + \frac{[(x_{nc} - x_c)\phi + \gamma]}{\alpha(x_{nc} - x_c)} \lambda_t, \quad (\text{C.1})$$

e

$$S = S_k - \frac{S_k \alpha (x_c \lambda_t + x_{nc} (1 - \lambda_t))}{r}. \quad (\text{C.2})$$

Agora podemos computar as derivadas da isóclina de λ em relação aos parâmetros γ , ϕ e σ :

$$\frac{\partial S}{\partial \gamma} = \frac{\lambda_t - 1}{\alpha(x_{nc} - x_c)} < 0, \quad (\text{C.3})$$

$$\frac{\partial S}{\partial \phi} = \frac{\lambda_t (x_{nc} - x_c)}{\alpha(x_{nc} - x_c)} > 0, \quad (\text{C.4})$$

$$\frac{\partial S}{\partial \sigma} = \frac{1}{\alpha(x_{nc} - x_c)} > 0. \quad (\text{C.5})$$

A isóclina de S não depende de γ , ϕ e σ , fazendo com que suas derivadas parciais sejam iguais a zero.