

Dinâmica Humana e da Natureza (HANDY): Modelando a Desigualdade e o Uso de Recursos no Colapso ou Sustentabilidade de Sociedades.

Safa Motesharrei

Escola de Política Pública e Departamento de Matemática. Universidade de Maryland e Centro Nacional de Síntese Socioambiental - (School of Public Policy and Department of Mathematics. University of Maryland and National Socio-Environmental Synthesis Center - SESYNC)

Jorge Rivas

Departamento de Ciência Política. Universidade de Minnesota e Instituto de Ambiente e Sociedade Global (Department of Political Science. University of Minnesota and Institute of Global Environment and Society – IGES)

Eugenia Kalnay

Departamento de Ciências Atmosféricas e Oceânicas. Universidade de Maryland (Department of Atmospheric and Oceanic Sciences. University of Maryland.)

18 de Março de 2014

Resumo

Há muita preocupação quanto à insustentabilidade das atuais tendências de uso dos recursos naturais. No entanto, as possibilidades reais de superação ou colapso permanecem controversas. Colapsos têm ocorrido com frequência na história das civilizações, muitas vezes seguidos por séculos de declínio econômico, intelectual e populacional. Fenômenos naturais e sociais diversos têm sido evocados para explicar colapsos específicos, ainda assim uma explicação geral permanece indefinida.

Neste artigo, vamos construir um modelo de dinâmica de populações humanas, acrescentando riqueza acumulada e desigualdade econômica a um modelo predador-presa de humanos e natureza. A estrutura do modelo, e cenários simulados que oferecem implicações significativas, são explicados. Quatro equações descrevem a evolução das Elites, Comuns, Natureza, e Riqueza. O modelo mostra que Estratificação Econômica e Pressão Ecológica podem levar ao colapso de forma independente, em concordância com o registro histórico.

A medida “Capacidade de Suporte” é desenvolvida e sua estimativa é demonstrada como um meio prático para detecção antecipada de um colapso. Mecanismos que levam a dois tipos de colapso são discutidos. As novas dinâmicas deste modelo podem reproduzir colapsos irreversíveis observados na História. Colapsos podem ser evitados e a população pode alcançar um estado de equilíbrio à capacidade de máxima de suporte se a taxa de esgotamento da natureza for reduzida a um nível sustentável e se os recursos forem distribuídos de maneira equitativa.

Palavras-chave: Dinâmicas Humano-Natureza; Colapsos Societais; Capacidade de Suporte; Superação vs. Sustentabilidade; Desigualdade Econômica; Tensão Ecológica.

1. Introdução

Há muita preocupação quanto à insustentabilidade das tendências atuais de uso dos recursos naturais, no entanto, as possibilidades reais de ultrapassagem¹ ou colapso permanecem controversas. Quão real é a possibilidade de um colapso social? Civilizações avançadas e complexas podem realmente colapsar? É comum ver a história humana como uma tendência inexorável e inevitável em direção a maiores níveis de complexidade social, organização política, especialização econômica, com o desenvolvimento de tecnologias mais complexas e capazes de oferecer suporte a uma população cada vez maior, tudo sustentado pela mobilização de quantidades cada vez maiores de material, energia e informação. No entanto, esta complexificação não é inevitável. Na verdade, os casos em que ela aparenta ser uma tendência quase universal a longo prazo têm comumente sido interrompidos de forma severa por um colapso precipitado – durando, muitas vezes, séculos. Uma breve revisão de alguns exemplos de colapsos, sugere que o processo de ascensão e colapso é, de fato, um ciclo recorrente encontrado ao longo da história, tornando-se importante estabelecer uma explicação geral deste processo [Tainter, 1988; Yoffee and Cowgill, 1988; Turchin and Nefedov, 2009; Chase-Dunn and Hall, 1997; Goldstein, 1988; Modelski, 1987; Meadows et al., 1972].

O dramático colapso do Império Romano (seguido de muitos séculos de declínio populacional, deterioração econômica, regressão intelectual e desaparecimento da alfabetização) é bem conhecido, mas não foi o primeiro ciclo de ascensão e colapso na Europa. Antes do surgimento da civilização Greco-Romana Clássica, tanto as civilizações Minóica e Micênica tinham ascendido, atingiram níveis muito avançados de civilização e, em seguida, entraram em colapso quase completo [Morris, 2005; Redman, 1999]. A história da Mesopotâmia, o berço da civilização, da agricultura, da sociedade complexa e da vida urbana, apresenta uma série de ascensões e quedas, incluindo os impérios Sumério, Acadiano, Assírio, Babilônico, Aquemênida, Selêucida, Parta, Sassânida, Omíada, e Abássida [Yoffee, 1979; Redman et al. De 2004]. No vizinho Egito, este ciclo também ocorreu repetidamente. Tanto na Anatólia como no vale do Indo, as grandes e duradouras civilizações Hititas e Harapeana desabaram tão completamente que sua existência era desconhecida até a arqueologia moderna redescobri-los. Ciclos semelhantes de ascensão e queda ocorreram várias vezes na Índia, mais notavelmente com os impérios Máuria e Gupta [Thapar, 2004; Jansen et al, 1991.; Kenoyer, 1998; Edwards et al., 1971, 1973]. A história chinesa é muito parecida com a do Egito, cheia de ciclos repetidos de ascensões e colapsos, com cada um dos impérios Zhou, Han, Tang e Song seguidos por um colapso muito sério da autoridade política e do progresso socioeconômico [Chu e Lee, 1994; Needham e Wang, 1956; Lee, 1931].

Os colapsos não se restringem ao “Velho Mundo”. O colapso da civilização Maia é bem conhecido e evoca o fascínio generalizado, tanto por causa da natureza avançada da sociedade Maia como por causa da profundidade do colapso [Webster, 2002; Demerest et al. , 2004]. Como Jared Diamond [Diamond , 2005] coloca, é difícil de ignorar “o desaparecimento de cerca de 90% à 99% da população Maia depois de 800 d.C... e o desaparecimento de reis, calendários de longas contagens, e outras instituições políticas e culturais complexas”. No planalto central do México, uma série de Estados poderosos também ascenderam para altos

1 No original “overshoot”. Pode ser parcialmente traduzido como “exceder” ou “ultrapassar”. Descreve uma variável de estado que ultrapassa o valor de equilíbrio ou estado estacionário, para depois tornar a convergir para o valor de equilíbrio com possíveis oscilações. Na figura 3b deste artigo é possível visualizar a representação gráfica do “overshoot” nas variáveis *commons* (comuns) e *wealth* (riqueza). Optou-se nesta tradução por traduzir a expressão com a palavra “ultrapassagem” (N.T.)

níveis de poder e prosperidade e, em seguida, rapidamente entraram em colapso, Teotihuacan (a sexta maior cidade do mundo no sétimo século) e Monte Alban são apenas as maiores delas a sofrer um colapso dramático, com suas populações diminuindo para cerca de 20-25% do seu pico dentro de apenas algumas gerações [Tainter, 1988].

Sabemos de muitos outros colapsos, incluindo Culturas Mississípianas como a Cahokia, Culturas do Sudoeste dos EUA como a Pueblo e Hohokam, Civilizações Andinas como Tiwanaku, Civilizações Sub-Saareanas como a do Grande Zimbábue, e muitos outros colapsos pelas Ilhas do Pacífico, como na Ilha de Páscoa. E ainda colapsos também ocorreram em sociedades que não possuíam um nível de complexidade em que pudessem produzir registros escritos ou evidências arqueológicas. De fato, um estudo recente [Shennan et al., 2013] do período neolítico na Europa demonstrou que “em contraste com o gradual crescimento populacional geralmente assumido, a introdução da agricultura no continente foi seguida de um quadro de explosão e redução demográfica” e, na maior parte das regiões, declínios populacionais “na ordem de 30 à 60%” podem ser constatados. Os autores também argumentam que, ao invés de mudanças climáticas ou doenças, as datações e evidências apontam para causas endógenas para 19 dos 23 casos estudados, sugerindo a possibilidade de “rápido crescimento demográfico levando através da agricultura a níveis insustentáveis”. Além disso, através da análise de curva dos dados arqueológicos, S. Downey [comunicação pessoal] demonstrou que o grau médio de tais ciclos explosões e reduções demográficas duram em torno de 300 a 500 anos.

Apesar da impressão comum de que um colapso social é raro, ou até mesmo em grande parte ficcional, “a imagem que emerge é o de um processo historicamente recorrente, e global na sua distribuição” [Tainter, 1988]. Veja também Yoffee e Cowgill [1988]; Goldstein [1988]; Ibn Khaldun [1958]; Kondratie [1984]; Parsons [1991]. Como Turchin e Nefedov [Turchin e Nefedov de 2009] afirmam, há um grande apoio para a “hipótese de que os ciclos seculares – oscilações sócio-político-demográficas de períodos muito longos (séculos de duração) são a regra, em vez de uma exceção, nos grandes estados e impérios agrários”.

Daí surge a questão se a civilização moderna é igualmente suscetível. Pode parecer bastante razoável acreditar que a civilização moderna, armada com sua maior capacidade tecnológica, conhecimento científico e recursos energéticos, será capaz de sobreviver e suportar qualquer crise em que outras sociedades na história sucumbiram. Mas o breve resumo de colapsos demonstra não só a onipresença do fenômeno, mas também a extensão em que sociedades avançadas, complexas e poderosas são suscetíveis a entrar em colapso. A queda do Império Romano, e os igualmente (se não mais) avançados impérios Han, Múria e Gupta, assim como tantos impérios mesopotâmicos avançados, são testemunho do fato de que civilizações avançadas, sofisticadas, complexas e criativas podem ser ao mesmo tempo frágeis e transitórias.

Um grande número de explicações tem sido proposto para cada caso específico de colapso, incluindo uma ou mais das seguintes opções: vulcões, terremotos, secas, enchentes, mudanças no curso de rios, degradação do solo (erosão, esgotamento, salinização, etc.), desmatamento, mudanças climáticas, migrações tribais, invasões estrangeiras, mudanças tecnológicas (como a introdução da metalurgia), mudanças nos métodos ou armas de guerra (como a introdução de cavalaria, infantaria blindada, ou espadas longas), mudanças nos padrões de comércio, esgotamento de recursos minerais específicos (por exemplo, minas de prata), declínio cultural e decadência social, revoltas populares e guerras civis. No entanto, essas explicações são mais específicas para cada caso particular de colapso do que uma explicação geral. Além disso, mesmo para o caso específico onde se aplica a explicação, a

sociedade em questão geralmente já tinha experimentado o fenômeno identificado como a causa sem entrar em colapso. Por exemplo, a sociedade Minóica tinha experimentado repetidamente terremotos que destruíram palácios, e eles simplesmente os reconstruíram mais esplêndidos do que antes. De fato, muitas sociedades experimentaram secas, inundações, vulcões, erosão do solo e desmatamento sem grandes perturbações sociais [Tainter, 1988].

O mesmo vale para as migrações, invasões e guerras civis. O império Romano, Han, Assírio e Máuria foram, durante séculos, completamente hegemônicos militarmente, derrotando com sucesso os vizinhos “bárbaros” que eventualmente tentavam invasões. Então, a pressão militar externa por si só, dificilmente constitui uma explicação para seus colapsos. Com ambos – desastres naturais e ameaças externas – identificar uma causa específica nos compele à questão: “sim, mas por que neste caso em particular tal fator gerou o colapso?” Outros processos devem estar considerados, e, de fato, as condições políticas, econômicas, ecológicas e tecnológicas sob as quais as civilizações têm colapsado têm variado muito. Colapsos individuais podem ter envolvido uma série de fatores específicos, com determinados gatilhos, mas uma explicação geral permanece indefinida. Explicações individuais podem parecer apropriadas em casos particulares, mas a própria natureza universal do fenômeno implica um mecanismo que não é específico a um período da história da humanidade, a um tempo em particular, nem a uma determinada cultura, tecnologia, ou desastre natural [Tainter, 1988; Yoffee e Cowgill, 1988; Turchin de 2003].

Neste artigo procura-se modelar matematicamente o colapso de uma forma mais geral. Propomos um modelo simples, não se destina a descrever casos individuais reais, mas sim fornecer um quadro geral que permite a realização de “experimentos mentais” para o fenômeno do colapso e testar as mudanças que poderiam evitá-lo. Este modelo (chamado **HANDY**, de **H**uman **A**nd **N**ature **D**ynamics – Dinâmica Humana e da Natureza) avança além dos modelos biológicos de dinâmica populacional existentes, modelando simultaneamente duas características importantes diferentes que parecem estar presente em todas as sociedades que entraram em colapso: **(1)** o esgotamento de recursos devido à pressão exercida sobre a capacidade de suporte ecológica² [Ponting, 1991; Redman, 1999; Redman et al, 2004.; Kammen, 1994; Postan, 1966; Ladurie, 1987; Abel, 1980; Catton, 1980; Wood, 1998; Wright, 2004], e **(2)** a estratificação econômica da sociedade em Elites e Comuns³ [Brenner, 1985; Parsons, 1991; Turchin, 2005, 2006; Turchin e Nefedov de 2009; Diamond, 2005; Goldstone, 1991;. Ibn Khaldun, 1958] Em muitos desses casos históricos, temos evidência direta da Pressão Ecológica e da Estratificação Econômica desempenhando um papel central no caráter ou no processo do colapso [Diamond, 2005; Goldstone, 1991 ; Culbert, 1973; Lentz, 2000; Mitchell, 1990]. Por estas razões empíricas, bem como pelas razões teóricas explicadas na seção 3, nosso modelo incorpora esses dois aspectos. Apesar de ser semelhante ao modelo de Brander e Taylor [1998] (também chamado de “BT”), o modelo HANDY é baseado no modelo predador-presa clássico. A inclusão de duas classes sociais introduz um conjunto muito mais rico de soluções dinâmicas, incluindo ciclos de colapso social e ecológico, bem como a possibilidade de chegar de maneira suave a um equilíbrio (capacidade de suporte ecológica). Usamos “Capacidade de Suporte” em sua definição biológica: a quantidade de população que

2 No original “ecological carrying capacity” (N.T)

3 No original “commoners”. Neste contexto a expressão tem o sentido de pessoas de uma sociedade que não fazem parte das elites e constituem a força de trabalho. Em inglês, está relacionado com “commons”, os “bens comuns” (terra, água, etc.). Outras traduções possíveis são “massas”, “povo” ou “plebeu”. Estas, no entanto, foram deixadas de lado devido à imprecisão ou ambiguidade de significados (N.T.)

os recursos de um determinado ambiente pode sustentar no longo prazo [Catton , 1980; Daly e Farley, 2003;. Cohen, 1995]. Neste artigo, nós chamamos esses recursos do ambiente de “Natureza”.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 trás uma breve revisão do modelo predador-presa; a seção 3 inclui a descrição matemática do HANDY; a seção 4 abrange uma análise teórica do modelo de equilíbrio e possíveis soluções; a seção 5 apresenta exemplos de cenários dentro de três tipos distintos de sociedades; seção 6 expõe uma discussão geral dos cenários da seção 5; e a seção 7 apresenta um breve resumo do artigo e uma discussão sobre o trabalho futuro.

2 Modelo Predador-Presa

O modelo predador-presa, a inspiração original por trás do HANDY, foi derivado de forma independente por dois matemáticos, Alfred Lotka e Vitto Volterra, no início do século XX [Lotka, 1925; Volterra, 1926]. Esse modelo descreve a dinâmica de competição entre duas espécies, digamos, lobos e coelhos. O sistema governante de equações é:

$$\begin{cases} \dot{x} = (ay)x - bx \\ \dot{y} = cy - (dx)y \end{cases} \quad (1)$$

No sistema acima, x representa a população de predadores (lobos); y representa a população de presas (coelhos); a determina a taxa de natalidade de predadores, ou seja, o crescimento mais rápido da população de lobos devido à disponibilidade de coelhos; b é a taxa de mortalidade de predadores, c é a taxa de natalidade da presa; d determina a taxa de predação, isto é, a velocidade com que coelhos são caçados por lobos.

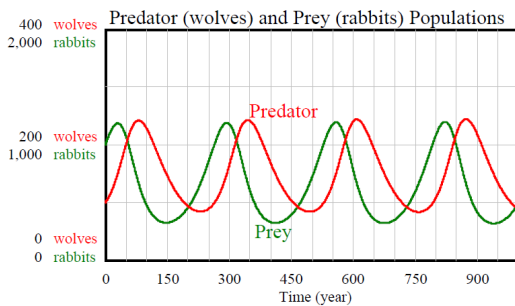


Figura 1: Uma solução típica do sistema predador presa obtido executando o sistema com os seguintes valores de parâmetros e condições iniciais: $a = 3.0 \times 10^{-5}$ (coelhos.anos) $^{-1}$, $b = 2.0 \times 10^{-2}$ anos $^{-1}$, $c = 3.0 \times 10^{-2}$ anos $^{-1}$, $d = 2.0 \times 10^{-4}$ (lobos.anos) $^{-1}$, $x(0) = 1.0 \times 10^{+2}$ lobos, e $y(0) = 1.0 \times 10^{+3}$ coelhos. A população dos Predadores é medida em unidades de lobos, a população das Presas é medida em unidades de coelhos, e Tempo é medido em unidades de anos.

Em vez de chegar a um equilíbrio estável, as populações de predadores e presas mostram variações periódicas fora de fase, em torno dos valores de equilíbrio

$$\begin{cases} x_e = c/d \\ y_e = b/a \end{cases} \quad (2)$$

Observe a consistência das unidades em ambos os lados da equação em (1) e (2). Uma solução típica do sistema predador-presa pode ser visto na figura 1.

3 HANDY

Como indicado acima, o modelo de Dinâmica Humana e da Natureza (HANDY) foi originalmente construído com base no modelo predador-presa. Podemos pensar a população humana como o "predador", enquanto a natureza (os recursos naturais do meio ambiente) pode ser tomada como a "presa", explorada pelos seres humanos. Em modelos animais, a capacidade de suporte é o limite máximo para a população no longo prazo. Quando a população supera a capacidade de suporte, mecanismos tais como a fome ou a migração trazem a população de volta para baixo. No entanto, no contexto das sociedades humanas, a população não necessariamente começa a diminuir após passar o limite de capacidade de suporte, porque, ao contrário dos animais, os seres humanos podem acumular grandes excedentes (ou seja, a riqueza) e depois fazer uso desses recursos quando a produção não pode mais atender as necessidades de consumo. Isso introduz um tipo diferente de atraso que permite dinâmicas muito mais complexas, alterando fundamentalmente o comportamento e a saída do modelo. Assim, nosso modelo adiciona o elemento do excedente acumulado, não exigido em modelos animais, mas que nós sentimos necessário para os modelos humanos. Chamamos este excedente acumulado de "riqueza".

Empiricamente, no entanto, este excedente acumulado não é uniformemente distribuído através da sociedade, mas tem sido controlado por uma elite. A maioria da população, embora produza a riqueza, recebe apenas uma pequena porção dela pelas elites, geralmente nos níveis de subsistência, ou pouco acima deles. Baseado nisso, e nos casos históricos discutidos na introdução, separamos a população em "Elites" e "Comuns", e introduzimos uma variável para a riqueza acumulada. Para uma análise desta estrutura de duas classes da sociedade moderna, ver Dragulescu e Yakovenko [2001]; Banerjee e Yakovenko [2010]. Isso adiciona uma dimensão diferente de predação pela qual as Elites "predam" a produção de riqueza pelo Povo. Como resultado, HANDY é composto por quatro equações de predição: duas para as duas classes de população, Elites e Comuns, denotadas por X_E e X_C , respectivamente; uma para os recursos naturais, ou Natureza, y ; e uma para a Riqueza acumulada, w , a seguir denominada "Riqueza". Este conjunto mínimo de quatro equações parece capturar características essenciais da interação humanos-natureza e é capaz de produzir os principais cenários potenciais de colapso ou de transição para um estado de equilíbrio.

Um modelo similar de dinâmica populacional e de recursos renováveis com base no modelo predador-presa foi desenvolvido no trabalho pioneiro de Brander e Taylor [1998], demonstrando que os valores de parâmetros razoáveis podem produzir padrões cíclicos de "abundância e fome" de população e recursos. O modelo deles mostrou que um sistema com uma base de recursos de crescimento lento vai apresentar ultrapassagem e colapso, enquanto uma base de recursos de crescimento mais rápido produzirá uma adaptação da população e recursos em direção a valores de equilíbrio. Eles, então, aplicaram este modelo ao caso histórico da Ilha de Páscoa, descobrindo que o modelo fornece uma explicação plausível para a dinâmica da população, conhecida a partir do registro arqueológico e científico sobre a Ilha de Páscoa. Assim, eles argumentam que os casos polinésios onde a população entrou em colapso foi devido a bases de recursos máximos menores (o que eles chamam de "capacidade de suporte"), que cresceram mais lentamente, enquanto que os casos que não experimentaram tal colapso o conseguiram por ter uma base de recursos maior (ou seja, uma capacidade de suporte maior). Eles, então, especularam que o seu modelo poderia ser compatível com outros

casos históricos de colapso, como as antigas civilizações da Mesopotâmia e Maia ou a Ruanda moderna.

No entanto, a abordagem de Brander e Taylor (BT) modela apenas População e Natureza e não inclui um componente central desses casos históricos: a estratificação econômica e acumulação de riqueza. Assim, apesar da clara evidência de uma estrutura estratificada de classe na história anterior ao colapso da Ilha de Páscoa (bem como na Mesopotâmia, com os antigos maias, e na Ruanda moderna), o modelo BT não inclui estratificação em classes como um fator. No modelo deles, a sociedade produz e consome como uma unidade homogênea. Acreditamos que uma modelagem historicamente realista da evolução da dinâmica humanos-natureza nestas complexas sociedades estratificadas não pode ser alcançada sem incluir esta estratificação de classes no modelo. Brander e Taylor reconhecem que seu modelo é simples, e que a aplicação de cenários mais complexos podem exigir um maior desenvolvimento da estrutura do modelo. Nós descobrimos que a inclusão da estratificação econômica, na forma da introdução de Elites e Comuns, bem como a Riqueza acumulada, resulta em uma variedade muito mais rica de soluções, que podem ter uma aplicação mais ampla nos diferentes tipos de sociedades. A estrutura do modelo HANDY também permite colapsos “irreversíveis”, sem a necessidade de introduzir um mecanismo explícito de densidade populacional crítica como outros modelos precisam fazer. Assim, enquanto o modelo Brander-Taylor tem apenas duas equações, HANDY tem quatro equações para prever a evolução das populações ricas e pobres (Elites e Comuns), natureza e riqueza acumulada. (Examinamos outras diferenças na seção 6.4 do artigo). As equações do HANDY são dadas por:

$$\begin{cases} \dot{x}_C = \beta_C x_C - \alpha_C x_C \\ \dot{x}_E = \beta_E x_E - \alpha_E x_E \\ \dot{y} = \gamma y(\lambda - y) - \delta x_C y \\ \dot{w} = \delta x_C y - C_C - C_E \end{cases} \quad (3)$$

Deve ser notado que α_C , α_E , C_C e C_E são todas funções de w , x_C e x_E . Ver equações (4) e (6) e figuras 2a e 2b.

3.1. Descrição do Modelo

A população total é dividida entre as duas variáveis, X_C e X_E , que representam a população dos comuns e das elites. A população cresce através de uma taxa de natalidade β e diminui através uma taxa de mortalidade α . β é assumida como constante para ambos, Elites e Comuns, mas α depende da riqueza como explicado abaixo.

Em realidade, os recursos naturais existem em três formas: estoques não-renováveis (combustíveis fósseis, depósitos minerais, etc.), estoques regenerativos (florestas, solos, rebanhos animais, peixes selvagens, animais de caça, aquíferos, etc.), e fluxos renováveis (vento, radiação solar, chuva, rios, etc.) As futuras gerações do modelo desagregarão estas formas. Adotamos uma única formulação com a intenção de representar uma fusão das três

formas, permitindo uma compreensão clara do papel que os recursos naturais desempenham em colapso ou sustentabilidade das sociedades humanas.

Assim, a equação para Natureza inclui um termo regeneração, $\gamma y(\lambda - y)$, e um termo de esgotamento, $-\delta x_c y$. O termo regeneração foi escrito na forma de uma equação logística, com um fator de regeneração γ , recrescimento exponencial para baixos valores de y , e saturação quando y se aproxima de λ , a capacidade da Natureza – Tamanho máximo da Natureza, na ausência de esgotamento. Como resultado, a taxa máxima de regeneração tem lugar quando $y = \lambda / 2$. A produção é entendida, de acordo com as formulações padronizadas de *Ecological Economics*, como envolvendo ambas as entradas e saídas da natureza (ou seja, o *esgotamento* dos recursos naturais e a *poluição* dos escoadouros naturais) [Daly e Farley, 2003; Daly, 1996]. Esta primeira geração do HANDY modela o *esgotamento* na equação, como se incluísse a redução na Natureza devido à *poluição*.

O termo do esgotamento inclui uma taxa de esgotamento por trabalhador, δ , e é proporcional à Natureza e ao número de trabalhadores. No entanto, a atividade econômica das Elites é modelada para representar funções executivas, de gerenciamento e supervisão, mas não o engajamento na extração direta de recursos, que é feito pelos comuns. Assim, apenas os Comuns produzem.

É frequentemente afirmado que a mudança tecnológica pode reduzir o esgotamento de recursos e, portanto, aumentar a capacidade de suporte. No entanto, os efeitos da mudança tecnológica sobre o uso de recursos não são unidirecionais. A mudança tecnológica pode aumentar a eficiência do uso de recursos, mas também tende a elevar tanto o consumo *per capita* quanto a escala de extração de recursos, de modo que, na ausência de efeitos políticos, o aumento no consumo muitas vezes compensa o aumento eficiência no uso dos recursos. Isto está associado ao fenômeno conhecido como Paradoxo de Jevons, e o “efeito de rebote” [Polimeni et al., 2008; Greening et al., 2000; Ruth, de 2009]. Por exemplo, um aumento na eficiência do combustível dos veículos tende a permitir um aumento per capita de quilômetros rodados, carros mais pesados, e as velocidades médias mais elevadas, que, em seguida, anulam os ganhos com o aumento da eficiência do combustível. Além disso, os avanços tecnológicos podem permitir uma maior extração de recursos e taxa de transferência, que, em seguida, aparece como aumento de produtividade de outros fatores de produção. Como Daly aponta, grande parte do aumento da produtividade na agricultura e indústria nos últimos dois séculos tem na verdade vindo de um aumento (em vez de queda) da transferência de recursos [Daly, 1991]. Geralmente se presume que a queda no preço de um recurso reflete um aumento na abundância desse recurso, mas, na verdade, muitas vezes reflete que o recurso simplesmente é extraído mais rapidamente. Ao invés de estender a capacidade de suporte, a reduz. A longo prazo, a utilização de recursos per capita tende a aumentar ao longo do tempo, apesar dos avanços tecnológicos dramáticos na eficiência dos recursos. Assim, o sinal e a magnitude do efeito da mudança tecnológica sobre a utilização de recursos varia e o efeito geral é de difícil previsão. Portanto, nesta geração do HANDY, assumimos que os efeitos dessas tendências se anulam mutuamente. O modelo será desenvolvido para permitir que as taxas dessas tendências induzidas pela tecnologia possam ser ajustadas em qualquer direção.

Finalmente, existe uma equação para a Riqueza acumulada, que aumenta com a produção, $\delta x_c y$, e diminui com o consumo das elites e dos comuns, C_c e C_e , respectivamente. O consumo dos comuns (desde que exista riqueza suficiente para remunerá-los) é SX_c , um salário de subsistência per capita, S , multiplicado pela população ativa. As Elites pagam a si mesmas um salário K vezes maior, de modo que o consumo das elites é KSX_e . No entanto, quando a

riqueza torna-se demasiado pequena para pagar por esse consumo, ou seja, quando $w < w_{th}$, o pagamento é reduzido e, eventualmente cessado, e a fome toma espaço, com uma taxa de mortalidade muito maior. K é utilizado aqui para representar os fatores que determinam a divisão da saída da produção total da sociedade entre as elites e as massas, como a correlação de força entre as elites e massas, e a capacidade de cada grupo para organizar e buscar seus interesses econômicos. Reconhecemos as limitações inerentes, nesta geração inicial de nosso modelo, de manter essa correlação (K) constante em cada cenário, mas esperamos desenvolver K em gerações posteriores do HANDY de modo que possa ser endogenamente determinado por outros fatores no modelo.

C_C e C_E , as taxas de consumo para os Comuns e a Elite, respectivamente, são dadas pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} C_C = \min\left(1, \frac{w}{w_{th}}\right) s x_C \\ C_E = \min\left(1, \frac{w}{w_{th}}\right) \kappa s x_E \end{cases} \quad (4)$$

O limite da Riqueza, w_{th} , é um valor limite para a riqueza, abaixo do qual a fome começa. Depende do “consumo mínimo necessário per capita”, ρ :

$$w_{th} = \rho x_C + \kappa \rho x_E. \quad (5)$$

Mesmo quando os Comuns começam a experimentar fome, isto é, quando $w \leq w_{th}$, as Elites continuam a consumir de forma desigual, tal como indicado pelo fator K no segundo termo do lado direito de (5). A representação gráfica das taxas de consumo é apresentada na figura 2a.

As taxas de mortalidade para Comuns e Elites, α_C e α_E , são funções da taxa de consumo:

$$\begin{cases} \alpha_C = \alpha_m + \max\left(0, 1 - \frac{C_C}{s x_C}\right) (\alpha_M - \alpha_m) \\ \alpha_E = \alpha_m + \max\left(0, 1 - \frac{C_E}{s x_E}\right) (\alpha_M - \alpha_m) \end{cases} \quad (6)$$

As taxas de mortalidade variam entre um valor normal (saudável), α_m , observado quando há alimento suficiente para a subsistência, e um valor máximo (fome), α_M que prevalece quando a riqueza acumulada já foi sendo usada e a população passa fome. Há uma variedade de mecanismos que podem reduzir a população quando se excede a capacidade de suporte, incluindo desde a emigração, aumento da susceptibilidade à doença, fome total, rupturas na ordem social e aumento da violência social, como banditismo, motins, rebeliões, revoluções e guerras. Estes mecanismos são descritos em detalhes em Turchin [2003], mas o efeito líquido de todos eles é a redução da população, e é isso que a dinâmica do nosso modelo representa quando dizemos “declínio da população” ou “fome”. Note-se também que um aumento nas taxas de mortalidade (α) equivale a uma diminuição igual nas taxas de nascimento (β). As taxas

de mortalidade α_C e α_E podem ser expressas em termos de $\frac{w}{w_{th}}$, , das quais uma representação gráfica é dada figura 2b.

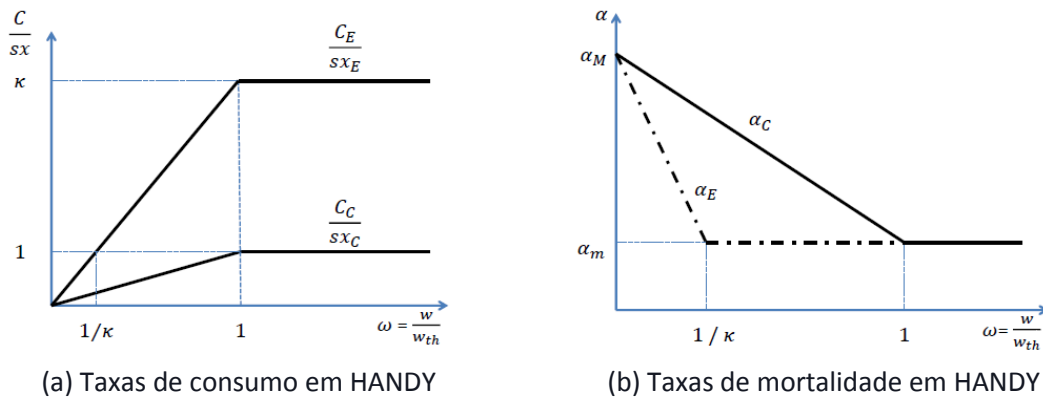


Figura 2: Taxas de consumo per capita e taxas de mortalidade para as Elites e Comuns, em função da Riqueza. A fome começa quando $\frac{C}{sx} \leq 1$. Portanto, os Comuns começam a experimentar a fome quando $\frac{w}{w_{th}} \leq \frac{1}{\kappa}$, enquanto as Elites não sentem fome até $\frac{w}{w_{th}} \leq 1$. Este atraso é devido ao acesso desigual das elites à riqueza.

3.2. Nota sobre Unidades e Dimensões

Há três dimensões para quantidades em HANDY:

1. População (Comuns ou Elites), em unidades de *peessoas*.
2. Natureza/Riqueza, em unidades de “*eco-dólares*”.
3. Tempo, em unidades de *anos*.

A estrutura do modelo requer que Natureza e Riqueza sejam medidas com as mesmas unidades, por isso criamos a unidade *eco-dólar*. Outros parâmetros e funções no modelo levam unidades que são compatíveis com as dimensões acima mencionadas, conforme (3). Por exemplo, capacidade de carga, χ , e capacidade de carga máxima, χ_M , definidas na seção 4.1, são ambas expressas em unidades de *peessoas*.

4. Valores de Equilíbrio e Capacidade de suporte.

Nós podemos usar o modelo para encontrar um equilíbrio sustentável e a capacidade máxima de suporte em diferentes tipos de sociedades. Para que a população alcance um equilíbrio, devemos ter $\alpha_m \leq \beta_E \leq \beta_C \leq \alpha_M$. Definimos um parâmetro adimensional, η :

$$\eta = \frac{\alpha_M - \beta_C}{\alpha_M - \alpha_m} \quad (7)$$

Desde que assumimos $\alpha_m \leq \beta_C \leq \alpha_M$, η será sempre limitada por $0 \leq \eta \leq 1$.

4.1. Equilíbrio quando $x_E = 0$ (Sem Elites): Sociedade Igualitária.

Assumindo $x_E \equiv 0$, podemos encontrar os valores de equilíbrio para o sistema (o “e” subscrito corresponde aos valores de equilíbrio):

$$\begin{cases} x_{C,e} = \frac{\gamma}{\delta} \left(\lambda - \eta \frac{s}{\delta} \right) \\ y_e = \eta \frac{s}{\delta} \\ w_e = \eta \rho x_{C,e} \end{cases} \quad (8)$$

Nós definimos χ , a Capacidade de Suporte para a população, para ser igual à $\chi_{C,e}$ em (8), i.e., o valor de equilíbrio da população na ausência de Elites:

$$\chi = \frac{\gamma}{\delta} \left(\lambda - \eta \frac{s}{\delta} \right) \quad (9)$$

A Capacidade de Suporte pode ser maximizada se a taxa de regeneração for máxima, i.e., se $y_e = \frac{\lambda}{2}$. Isso requer que δ seja igual ao valor δ_* que pode resultar em um estado de equilíbrio com o máximo (sustentável) da População, que neste trabalho chamamos de o valor “ideal” de δ . Na segunda equação em (8), pode-se observar que δ_* é dado por:

$$\delta_* = \frac{2\eta s}{\lambda} \quad (10)$$

A Capacidade Máxima de Suporte, χ_M , é assim dada por:

$$\chi_M = \frac{\gamma}{\delta_*} \frac{\lambda}{2} = \frac{\gamma}{\eta s} \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 \quad (11)$$

4.2. Equilíbrio quando $x_E \geq 0$ e $\kappa = 1$ (Sem desigualdade): Sociedade Equitativa.

Se colocarmos $\kappa \equiv 1$ e $\beta_E \equiv \beta_C \equiv \beta$, nós podemos alcançar um estado de $x_E \geq 0$. equilíbrio para o qual Este caso modela uma sociedade equitativa com

“Trabalhadores” e “Não-Trabalhadores”. Precisamos de um parâmetro adimensional livre φ que define a taxa inicial de Não-Trabalhadores para Trabalhadores:

$$\varphi = \frac{x_E(0)}{x_C(0)} \quad (12)$$

Os valores de equilíbrio para o sistema podem ser expressos como a seguir:

$$\begin{cases} x_{C,e} &= \frac{\gamma}{\delta} \left(\lambda - \eta \frac{s}{\delta} (1 + \varphi) \right) \\ x_{E,e} &= \varphi x_{C,e} \\ y_e &= \eta \frac{s}{\delta} (1 + \varphi) \\ w_e &= \eta \rho (1 + \varphi) x_{C,e} \end{cases} \quad (13)$$

A população total $x_e = x_{C,e} + x_{E,e}$ ainda pode ser maximizada escolhendo o δ apropriadamente:

$$\delta_{**} = \frac{2\eta s}{\lambda} (1 + \varphi) \quad (14)$$

Este δ_{**} é maior do que o fator de esgotamento ideal dado por (10). A diferença surge porque os Trabalhadores têm de produzir mais do que o necessário para si mesmos, a fim de sustentar os Não-Trabalhadores. Para esta escolha do δ , a população total é dada por:

$$x_{e,M} = (1 + \varphi) \frac{\gamma}{\delta_{**}} \frac{\lambda}{2} = \frac{\gamma}{\eta s} \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 \quad (15)$$

Como pode ser visto a partir de (15), a população total máxima em equilíbrio é independente de δ , e está de acordo com a capacidade máxima de suporte indicadas por (11).

4.3. Equilíbrio $x_E \geq 0$ e $\kappa > 1$: Sociedade Desigual.

É possível atingir o equilíbrio em uma sociedade desigual, se pudermos satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{\alpha_M - \beta_E}{\kappa(\alpha_M - \alpha_m)} = \frac{\alpha_M - \beta_C}{\alpha_M - \alpha_m} = \eta. \quad (16)$$

(A condição geral $\alpha_m \leq \beta_E \leq \beta_C \leq \alpha_M$ deve ser mantida em todos os casos para que o equilíbrio seja viável.)

Os valores de equilíbrio neste caso geral podem ser expressos pelo seguinte:

$$\begin{cases} x_{C,e} &= \frac{\gamma}{\delta} \left(\lambda - \eta \frac{s}{\delta} (1 + \kappa\psi) \right) \\ x_{E,e} &= \psi x_{C,e} \\ y_e &= \eta \frac{s}{\delta} (1 + \kappa\psi) \\ w_e &= \eta \rho (1 + \kappa\psi) x_{C,e} \end{cases} \quad (17)$$

O parâmetro livre, ψ , é a taxa de equilíbrio $x_{E,e}/x_{C,e}$, evidente na segunda equação em (17). Ao contrário de φ , ψ não pode ser facilmente relacionado com as condições iniciais; em vez disso, pode ser determinado a partir do resultado de uma simulação.

Novamente, a população total $x_e = x_{C,e} + x_{E,e}$ pode ser maximizada escolhendo δ apropriadamente:

$$\delta_{***} = \frac{2\eta s}{\lambda} (1 + \kappa\psi) \quad (18)$$

Esta taxa de esgotamento δ_{***} necessária pode ser ainda maior do que o δ ideal dado por (14), dependendo dos valores de κ e ψ . Na presença de desigualdade, a população total máxima não é independente de κ e ψ e é menor do que a capacidade máxima de suporte dada pela equação (11) e (15):

$$x_{e,M} = (1 + \psi) \frac{\gamma}{\delta_{***}} \frac{\lambda}{2} = \frac{\gamma}{\eta s} \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 \left(\frac{1 + \psi}{1 + \kappa\psi} \right) \quad (19)$$

5. Cenários

Discutiremos três conjuntos de cenários:

Símbolo do parâmetro	Nome do parâmetro	Valor típico
α_m	Taxa de mortalidade normal (mínima)	$1,0 \times 10^{-2}$
α_M	Taxa de mortalidade na fome (máxima)	$7,0 \times 10^{-2}$
B_C	Taxa de natalidade de comuns	$3,0 \times 10^{-2}$
β_E	Taxa de natalidade da elite	$3,0 \times 10^{-2}$
s	Salário de subsistência per capita	$5,0 \times 10^{-4}$
ρ	Limiar de riqueza per capita	$5,0 \times 10^{-3}$
γ	Taxa de regeneração da Natureza	$1,0 \times 10^{-2}$
λ	Capacidade de Suporte da Natureza	$1,0 \times 10^{+2}$
κ	Fator de desigualdade	1, 10, 100
δ	Fator de esgotamento (produção)	Nenhum

(α) Lista de parâmetros em HANDY. κ e δ assumem valores diferentes nos diferentes cenários

Símbolo do parâmetro	Nome do parâmetro	Valor inicial típico
x_C	População de Comuns	$1,0 \times 10^{+2}$
x_E	População da Elite	0, 1, 25
y	Natureza	λ
w	Riqueza acumulada	0

(β) Lista de variáveis de estado em HANDY. $x_E(0)$ assume diferentes valores nos diferentes cenários

Tabela 1: Descrição dos parâmetros e variáveis de estado usados em HANDY. κ , δ , e x_E são manipulados para estudar vários cenários em três diferentes tipos de sociedades. $x_E = 0$ define uma sociedade igualitária sem elites. $\kappa = 1$ define uma sociedade equitativa, com trabalhadores e não-trabalhadores, representada por x_p e x_E nesse caso, respectivamente. $x_E = 0$ e $\kappa > 1$ definem uma sociedade desigual com Elites e Comuns (x_E e x_C). Como referência, todas as outras variáveis e funções em HANDY também são listadas acima. Ao longo desse artigo, o subscrito e denota valor de *equilíbrio*.

1. Sociedade igualitária (sem elites): cenários nos quais $x_E = 0$.

2. Sociedade equitativa (com trabalhadores e não-trabalhadores): cenários nos quais $\chi_E \geq 0$ mas $\kappa \cong 1$.
3. Sociedade desigual (com elites e comuns): cenários nos quais $\chi_E \geq 0$ e $\kappa > 1$.

Para todos esses cenários, começamos o modelo com os valores de parâmetros típicos e condições iniciais dados na tabela 1, a menos que especificado de outra forma. Como indicado acima, os valores de κ e $\chi_E(0)$ determinam o tipo de sociedade. Dentro de cada tipo de sociedade, obtemos diferentes cenários variando o fator de esgotamento, δ .

Nesta seção, mostraremos que o modelo HANDY é capaz de modelar três tipos distintos de sociedade, mudando κ e $\chi_E(0)$. Um equilíbrio sustentável pode ser encontrado para cada sociedade, controlando δ . Uma escolha apropriada de δ pode tornar este equilíbrio ótimo, isto é, com população total máxima. Aumentar δ acima de seu valor ótimo faz com que a aproximação do equilíbrio se torne oscilatória. Tal equilíbrio é sub-ótimo, e a Capacidade de Suporte fica abaixo de seu valor máximo, χ_M . Também é possível alcançar um equilíbrio sub-ótimo (uma população menor do que o máximo, mas sustentável) fazendo δ menor do que o seu valor ótimo. Porém, no último caso, a aproximação do equilíbrio seria uma aterrissagem suave, ao invés de oscilatória. Quando δ é aumentada ainda mais, a sociedade entra em ciclos de prosperidade e colapso. Aumentando δ além de um certo ponto resultará em um colapso irreversível Tipo-N (total), dos quais são apresentados exemplos nas seções 5.1.4, 5.2.4 e 5.3.2. Oferecemos uma categorização completa dos colapsos nos próximos dois parágrafos.

Símbolo da variável	Nome da variável	Equação definidora
w_{th}	Limiar de riqueza	(5)
ω	Riqueza normalizada	w/w_{th}
C_C	Consumo dos comuns	(4) (figura 2a)
C_E	Consumo da elite	(4) (figura 2a)
α_C	Taxa de mortalidade dos comuns	(6) (figura 2b)
α_E	Taxa de mortalidade da elite	(6) (figura 2b)
η	η	(7)
χ	Capacidade de suporte	(9)
δ^*	δ ótimo igualitário	(10)
χ_M	Capacidade de suporte máxima	(11)
φ	Razão de não-trabalhadores para trabalhadores (equitativa)	(12)
δ^{**}	δ ótimo equitativo	(14)

ψ	Razão de equilíbrio entre Elites e Comuns (desigual)	$x_{E,e}/x_{P,e}$
δ^{***}	δ ótimo desigual	(18)

Tabela 2: Como referência, todas as outras variáveis e funções no modelo HANDY são listadas nesta tabela. O subscrito *e* denota valor de *equilíbrio* ao longo deste artigo.

Executar o modelo em diferentes cenários produz dois tipos de colapso, por escassez de força de trabalho (na sequência de uma fome *induzida por desigualdade*) ou devido à escassez da Natureza (esgotamento dos recursos naturais). Categorizamos o primeiro caso como um Colapso Tipo-T (desaparecimento da força de trabalho) e o último como um Colapso Tipo-N (exaustão da natureza). Em um colapso de Tipo-T, o crescimento da população da elite limita a disponibilidade de recursos para os comuns. Isso causa o declínio da população de comuns (que desempenha o trabalho), e conseqüentemente, o declínio da riqueza. Finalmente, a população da elite cai, pois a fonte de sua própria subsistência, isto é, a riqueza, desapareceu. Ver a figura 6a para um exemplo de um colapso de Tipo-T. Isso poderia representar um caso histórico como o desaparecimento da civilização maia em Yucatan. Note que esse tipo de colapso só pode acontecer em uma sociedade desigual, porque a causa subjacente mais importante é a *desigualdade*.

Um colapso Tipo-N, por outro lado, começa com a exaustão da Natureza, seguida pelo declínio da riqueza, que, por sua vez, causa uma queda dos comuns e então das elites. Dependendo da taxa de esgotamento, colapsos Tipo-N podem ser “reversíveis” ou “irreversíveis”. Após um colapso reversível, a recuperação da natureza pode disparar um novo ciclo de prosperidade, cujos exemplos podem ser vistos nas figuras 3c e 4c. Isso poderia representar casos históricos como os colapsos grego e romano.

Quando o esgotamento é levado além de um certo limite, a Natureza colapsa completamente, e o sistema como um todo colapsa depois disso. É por isso que chamamos um colapso irreversível Tipo-N de colapso “total”. Exemplos de tais colapsos podem ser vistos nas figuras 3d, 4d e 6b. Isso poderia representar um caso histórico como a exaustão da Natureza na Ilha da Páscoa. Colapsos Tipo-N podem surgir devido *somente* ao esgotamento excessivo (figuras 4d e 4d), ou tanto por esgotamento excessivo quanto por *desigualdade* (figura 6b).

É importante entender a interrelação entre o fator de esgotamento, δ , e a Capacidade de Suporte, χ . Quanto mais δ é distanciado de seu valor ótimo, mais χ diminui em relação ao seu valor máximo, χ_M . Um equilíbrio pode ser alcançado se e somente se χ não está muito distante de χ_M , o que significa que δ não pode estar muito distante de seu valor ótimo, dado pelas equações (10), (14) e (18) nos três tipos de sociedade sob consideração. Note que em todos os resultados dos cenários apresentados abaixo (para os três tipos de sociedade sob consideração), a Capacidade de Suporte (χ) e a Capacidade de Suporte Máxima (χ_M) são calculadas a partir de suas equações definidoras (9) e (11), respectivamente.

Nota importante sobre as unidades do eixo vertical de todos os gráficos subsequentes: As populações, x_C e x_E , e a Capacidade de Suporte, χ , são todas normalizadas em relação à Capacidade de Suporte Máxima, χ_M . A Natureza e a Riqueza são ambas mostradas em unidades de capacidade da Natureza, λ . A escala na parte de cima do eixo vertical do gráfico se refere à(s) População(ões) e à Capacidade de Suporte; a escala do meio se refere à Natureza, que (normalmente) permanece dentro do intervalo de 1λ ; e a escala de baixo é para a Riqueza.

Nota: Todas as simulações abaixo usam o método da integração de Euler, com um passo de 1 ano e precisão simples.

5.1 Sociedade Igualitária (sem elites): $x_E = 0$

Nos quatro cenários seguintes, κ não tem nenhuma influência, pois definimos $x_E \cong 0$. Começamos a taxa de esgotamento com $\delta = \delta_*$, o valor de equilíbrio ótimo que maximiza a Capacidade de Suporte, e o elevamos lentamente para obter cenários adicionais. A linha vermelha horizontal nos gráficos dos quatro cenários dessa seção representam a população zero das Elites.

5.1.1 Sociedade igualitária: aterrissagem suave ao equilíbrio

Para o cenário na figura 3a, $\delta = \delta_* = 6,67 \times 10^{-6}$. A capacidade de suporte, χ , está no seu valor máximo, χ_M . Note que a Natureza também se estabiliza com $y_e = \lambda/2$, que é o valor que resulta na máxima taxa de regeneração. Essa regeneração máxima pode, por sua vez, sustentar um esgotamento e uma população máximas sustentáveis.

Se definimos $\delta < \delta_*$, ainda vemos uma aterrissagem suave para a capacidade de suporte, χ . Porém, χ estaria em um nível mais baixo do que χ_M , porque um δ menor do que o ótimo não corresponde à máxima regeneração da natureza, o que é uma necessidade se queremos ter uma poluição *máxima sustentável*. A vantagem de um δ inferior ao ótimo é um nível de equilíbrio mais alto (comparado a $\lambda/2$) para a Natureza.

Escolher uma taxa de esgotamento, δ , que é muito pequena para produzir o suficiente para alimentar a população resultaria em um colapso, e portanto torna qualquer equilíbrio impossível, mesmo que a Natureza permaneça com a sua capacidade máxima. É claro que isso não ocorreria no mundo real, pois a urgência da sobrevivência faz com que os homens extraiam as suas necessidades básicas da natureza.

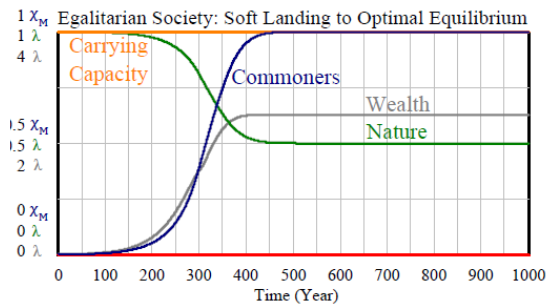
5.1.2 Sociedade Igualitária: aproximação oscilatória do equilíbrio

Para o cenário na figura 3b, δ é aumentado até $\delta = 2,5\delta_* = 1,67 \times 10^{-5}$. Como pode ser visto na figura 3b, a capacidade de suporte, χ , é menor do que o seu valor máximo, χ_M . A população inicialmente apresentada ultrapassa a capacidade de suporte, passa a oscilar, e finalmente

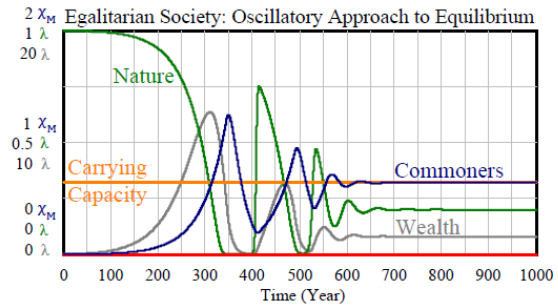
converge a ela, uma vez que a magnitude da *ultrapassagem* não é muito grande, mas da ordem de grandeza de χ . Note que no tempo em que a população (total) ultrapassa a Capacidade de Suporte, a Riqueza também alcança um máximo e começa a declinar.

5.1.3 Sociedade Igualitária: ciclos de prosperidade, *ultrapassagem*, colapso e restabelecimento

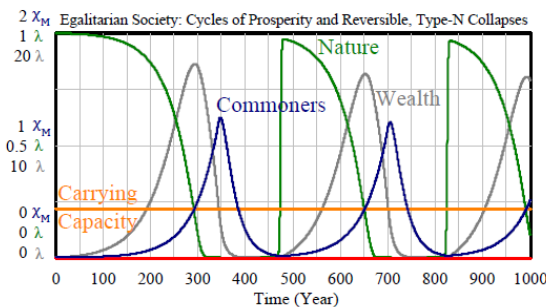
Para o cenário na figura 3c, δ é aumentado até $\delta = 4\delta^* = 2,67 \times 10^{-5}$. Como pode ser visto, População, Natureza e Riqueza colapsam para um valor muito pequeno. Porém, após o esgotamento tornar-se pequeno devido ao número muito reduzido de trabalhadores, a Natureza tem a oportunidade de se restabelecer até próximo de sua capacidade, λ . O restabelecimento da Natureza dá início a outro ciclo de prosperidade, que termina com outro colapso.



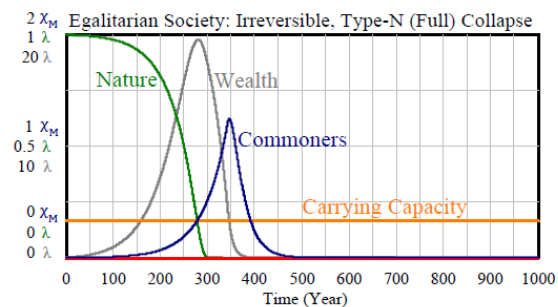
(a) Aterrissagem suave para o equilíbrio ótimo quando a população da Elite (em vermelho) é zero. A população final atinge a capacidade de suporte, que está em seu valor máximo, χ_M , neste cenário.



(b) Aproximação oscilatória do equilíbrio quando a população da Elite (em vermelho) é zero. A população final converge para a capacidade de suporte, que é menor do que o seu valor máximo, χ_M , neste cenário.



(c) Ciclos de prosperidade, *ultrapassagem*, colapso (Tipo-N reversível) e restabelecimento quando a população da Elite (em vermelho) é zero.



(d) Colapso Tipo-N irreversível (colapso total) quando a população da Elite (em vermelho) é zero. Todas as variáveis de estado colapsam a zero neste cenário, devido ao super-esgotamento.

Figura 3: resultados do experimento para a sociedade igualitária

Os resultados da simulação mostram que esses ciclos, terminando em colapsos Tipo-N (isto é, aqueles que começam devido à escassez da Natureza) se repetem indefinidamente. Portanto, tais ciclos representam colapsos Tipo-N “reversíveis”. Essa reversibilidade é possível desde que δ permaneça dentro de uma proximidade “segura” de δ_* .

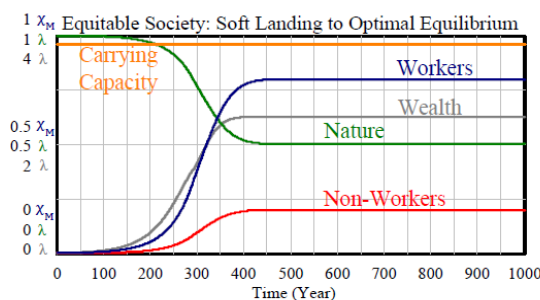
5.1.4 Sociedade Igualitária: colapso Tipo-N irreversível (colapso total)

Para o cenário na figura 3d, δ é aumentado até $\delta = 5.5\delta_* = 3,67 \times 10^{-5}$. A *ultrapassagem* é tão grande que ele força População, Natureza e Riqueza a um colapso total, do qual não há recuperação possível. Esse é um tipo genérico de colapso que pode acontecer para qualquer tipo de sociedade devido ao sobre-esgotamento. Ver as seções 5.2.4 e 5.3.2 para exemplos de colapsos Tipo-N irreversíveis em sociedades equitativas e desiguais, respectivamente. Incluímos uma maior discussão desses dois tipos de colapso na seção 6.

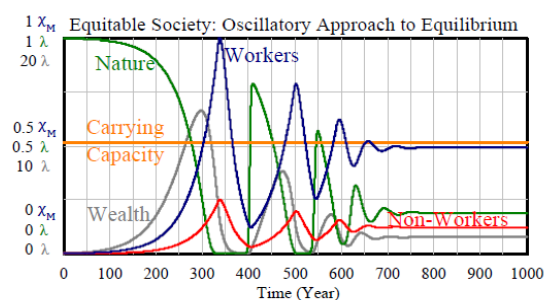
Observamos que a Riqueza acumulada atrasa o declínio da população mesmo depois que a Natureza declinou bem abaixo de sua capacidade, λ . Portanto, a população segue crescendo e exaurindo a Natureza até que ela seja completamente exaurida. Nesse caso, isto é, quando $y = 0$, a Natureza não pode mais crescer; de fato, ela começa a decair, causando uma queda brusca do nível populacional, e finalmente o seu colapso completo e irreversível.

5.2 Sociedade Equitativa (com trabalhadores e não-trabalhadores): $\kappa = 1$

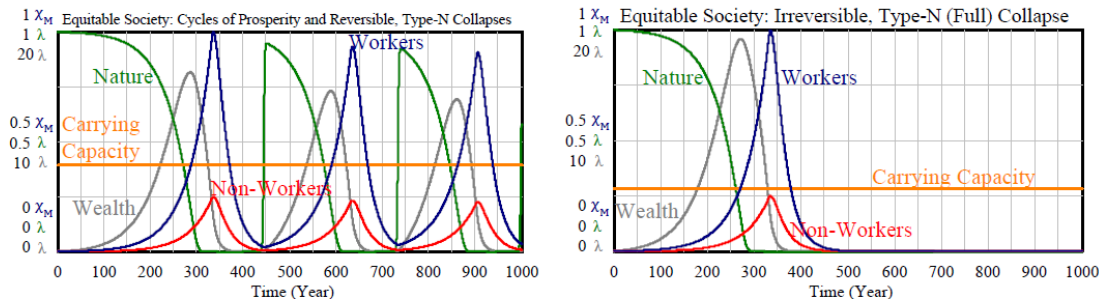
Tomamos como valores dos parâmetros e condições iniciais os mesmos da tabela 1, exceto que dessa vez definimos $x_E(0) = 25$ ($\phi = 0,25$) e $\kappa = 1$. Começamos com o esgotamento per capita ótima de $\delta = \delta_*$, que sustentará a população máxima (ver (14)), e iremos gradualmente aumentá-la, para obter os cenários adicionais dessa subseção. Note que nesses casos, x_C descreve a População Trabalhadora, enquanto x_E descreve a população Não-Trabalhadora. Todos consomem no mesmo nível, uma vez que definimos $\kappa = 1$, isto é, assumimos que não há desigualdade no nível de consumo para Trabalhadores e Não-Trabalhadores.



(a) O equilíbrio na presença tanto de trabalhadores quanto não-trabalhadores pode ser atingido com crescimento lento e salários equitativos.



(b) A aproximação oscilatória do equilíbrio na presença tanto de trabalhadores quanto de não-trabalhadores é possível quando a *ultrapassagem* não é muito grande.



(c) Ciclos de prosperidade, *ultrapassagem*, colapso (Tipo-N reversível) e restabelecimento na presença de trabalhadores e não-trabalhadores.

(d) Colapso Tipo-N irreversível (colapso total) acontece após um período de crescimento muito rápido.

Figura 4: resultados do experimento para a sociedade equitativa

5.2.1 Sociedade Equitativa: aterrissagem suave no equilíbrio ótimo

Para o cenário na figura 4a, $\delta = \delta^{**} = 8,33 \times 10^{-6}$. Note que isso é maior do que o valor ótimo na ausência de Não-Trabalhadores, $\delta^* = 6,67 \times 10^{-6}$, ainda que todos os outros parâmetros sejam idênticos àquelas da seção 5.1.1. Essa diferença surge porque $x_E \neq 0$, o que por sua vez força os Trabalhadores a produzir mais para sustentar os Não-Trabalhadores. Agora, $\chi < \chi_M$, porque $\delta = \delta^{**} \neq \delta^*$. Porém, ao definir $\delta = \delta^{**}$, o valor ótimo de χ na presença de Não-Trabalhadores, a população total, $x_C + x_E$ ainda atinge uma Capacidade de Suporte máxima, χ_M , a mesma da seção 5.1. Ver a equação (15) e a seção 4.2 para uma descrição matemática.

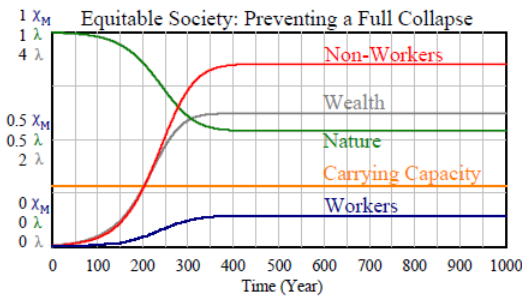


Figura 5: O colapso total que aconteceu no cenário anterior, figura 4d da seção 5.2.4, pode ser evitado reduzindo o esgotamento *médio* per capita. Isso pode ser conseguido aumentando a razão da população de não-trabalhadores para trabalhadores (alto δ , alto φ) ou reduzindo a carga de trabalho média por trabalhador, isto é, diminuindo as horas de trabalho totais por semana (baixo δ , baixo φ)

Comentários similares aos da seção 5.1.1 se aplicam aqui quando escolhemos um δ menor que o ótimo.

5.2.2 Sociedade Equitativa: aproximação oscilatória do equilíbrio

Para o cenário na figura 4b, $\delta = 2,46\delta^{**} = 2,20 \times 10^{-5}$. A população total final iguala a Capacidade de Suporte (menor do que Capacidade de Suporte máxima).

5.2.3 Sociedade Equitativa: ciclo de prosperidade, *ultrapassagem*, colapso e restabelecimento

Para o cenário na figura 4c, $\delta = 3,46\delta^{**} = 3,00 \times 10^{-5}$. O resultado é análogo à figura 3c que corresponde à seção 5.1.3. Como antes, o instante no qual a população total *ultrapassa* a Capacidade de Suporte real é indicada pelo fato de que a Riqueza começa a diminuir. Após cada ciclo de prosperidade, há um colapso Tipo-N parcial, reversível.

5.2.4 Sociedade Equitativa: colapso total

Para o cenário da figura 4d, $\delta = 5\delta^{**} = 4,33 \times 10^{-5}$. Mais uma vez, podemos ver como um colapso (total) Tipo-N de População, Natureza e Riqueza pode ocorrer devido ao superesgotamento dos recursos naturais, como resultado de um alto esgotamento per capita.

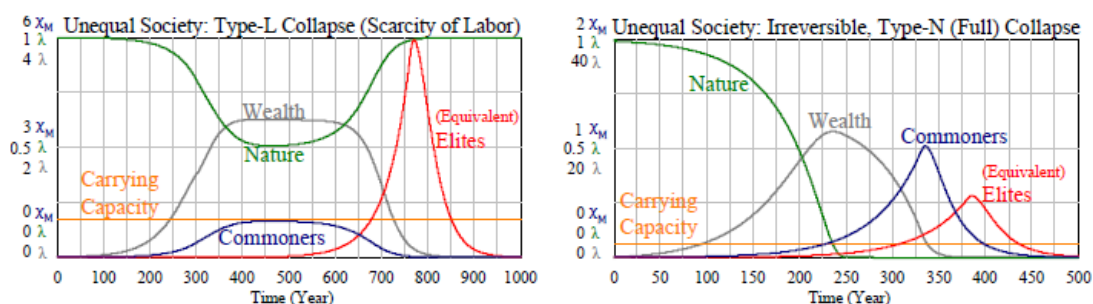
5.2.5 Sociedade Equitativa: evitando um colapso total diminuindo o esgotamento *médio* per capita

O caso na figura 5 é similar ao caso anterior (ver seção 5.2.4 e figura 4d), exceto que aumentamos a razão de Não-Trabalhadores, ϕ , de 0,25 para 6. Isso corresponde a mudar $x_E(0)$ de 25 para 600, mantendo $x_C(0) = 100$. Ao aumentar a razão de não-trabalhadores e trabalhadores, um equilíbrio sustentável pode ser alcançado devido ao menor esgotamento *médio* per capita – um δ equivalente se todos contribuíssem igualmente para o trabalho. Isso também poderia ser interpretado como a modelagem de uma redução da carga de trabalho média por trabalhador.

5.3 Sociedade Desigual (com Elites e Comuns): $x_E \geq 0$ e $\kappa > 1$

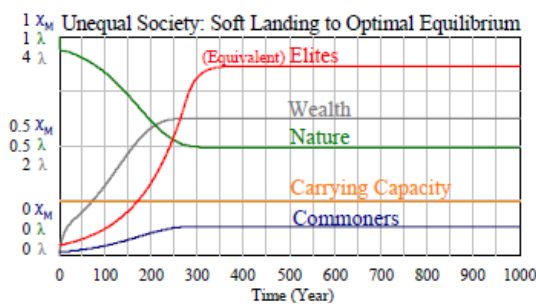
Em nossos exemplo de sociedade desigual, as Elites consomem ≈ 10 a 100 vezes mais (per capita) do que os Comuns. A sua população, em vermelho nos gráficos, é multiplicada por κ para representar o seu impacto equivalente devido ao seu maior consumo. É por isso que usamos a etiqueta “Elites *equivalentes*” nos gráficos dessa seção, 5.3.

Nos dois primeiros casos, discutimos dois tipos de colapso distintos, porém genéricos, em uma sociedade desigual. Nesses cenários, $\kappa = 100$. Então mostraremos a possibilidade de atingir o equilíbrio reduzindo κ para 10 e ajustando as taxas de natalidade β_E e β_C de forma independente. Esses dois cenários com $\kappa = 10$ mostram que para atingir um equilíbrio sustentável em uma sociedade desigual, é necessário haver políticas que limitem a desigualdade e assegurem que as taxas de natalidade permaneçam abaixo de níveis críticos.

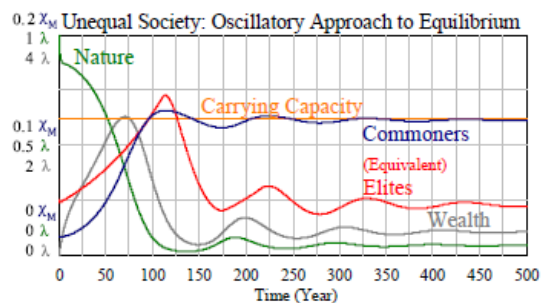


(a) Colapso da população na sequência de um equilíbrio aparente devido a uma população inicial de Elite pequena quando $\kappa = 100$. Esse cenário também mostra uma rota diferente para o colapso, no qual, ainda que a natureza ao final se recupere, esse não é o caso para a população.

(b) Um rápido colapso total devido tanto ao superesgotamento quanto à desigualdade ($\kappa = 100$)



(c) Com desigualdade moderada ($\kappa = 10$), é possível atingir um equilíbrio ótimo com o controle das taxas de natalidade.



(d) Com $\delta \gg \delta^{***}$, ainda é possível oscilar e convergir a um equilíbrio ($\kappa = 10$)

Figura 6: resultados do experimento para a sociedade desigual

5.3.1 Sociedade Desigual: colapso Tipo-T (força de trabalho desaparece, natureza se restabelece)

Esse cenário, apresentado na figura 6a, é exatamente o mesmo que o caso do equilíbrio sem Elites apresentado na seção 5.1.1 (figura 3a), exceto que aqui definimos $x_E(0) = 1,0 \times 10^{-3}$. Essa é de fato uma população inicial de elite muito pequena. Os dois cenários são bastante parecidos até aproximadamente $t = 500$ anos após o início da simulação. A população da Elite começa a crescer significativamente apenas após $t = 500$, causando assim o esgotamento da Riqueza e levando o sistema ao colapso. Sob esse cenário, o sistema colapsa devido à escassez de trabalhadores, mesmo que os recursos naturais ainda sejam abundantes, mas como a taxa de esgotamento é ótima, passam mais de 400 anos depois que a Riqueza atinge um máximo para que a sociedade entre em colapso. Nesse exemplo, os Comuns são extintos primeiro, e as Elites desaparecem mais tarde. Esse cenário mostra que em uma sociedade que é, sob outros aspectos, sustentável, o consumo muito desigual das elites ainda causará um colapso.

Esse cenário é um exemplo de colapso Tipo-T no qual tanto a População quanto a Riqueza colapsam, mas a natureza se recupera (para a sua capacidade máxima, λ , na ausência de

esgotamento). A escassez de trabalhadores é a causa inicial de um colapso Tipo-T, ao contrário da escassez da natureza para um colapso Tipo-N.

5.3.2 Sociedade Desigual: colapso Tipo-N irreversível (colapso total)

O cenário típico na figura 6b para um colapso total é o resultado de executar o modelo com os valores de parâmetros e condições iniciais dados na tabela 1. Exemplos de colapsos irreversíveis Tipo-N (total) nas sociedades igualitária e equitativa são apresentados nas seções 5.1.4 (figura 3d) e 5.2.4 (figura 4d).

Definimos uma pequena população inicial de $x_E(0) = 0,20$, $\kappa = 100$, e um grande esgotamento $\delta = 1,0 \times 10^{-4}$, de maneira que tanto o esgotamento $\delta = 15\delta^*$ e o coeficiente de desigualdade = 100 são muito grandes. Essa combinação resulta em um colapso total do sistema, sem recuperação. A Riqueza começa a declinar no instante em que a população de Comuns supera a sua capacidade de suporte, e então o colapso total leva apenas cerca de 250 anos a partir disso. A Riqueza declinante causa a queda da população de Comuns (trabalhadores), com um atraso [tempo morto, *time lag*]. A rápida redução do número de trabalhadores combinada com a escassez de recursos naturais faz com que a Riqueza decline ainda mais rápido do que antes. Como resultado, as Elites – que podem inicialmente sobreviver à fome devido ao seu acesso desigual aos bens de consumo ($\kappa = 100$) – ao final também morrem de fome. Note que devido ao fato de que tanto o esgotamento quanto a desigualdade são grandes, o colapso ocorre mais rápido e em um nível de população muito mais baixo do que no caso anterior (ver seção 5.3.1, figura 5.3.1) com uma taxa de esgotamento de $\delta = \delta^*$.

5.3.3 Sociedade Desigual: aterrissagem suave em um equilíbrio ótimo

$$\left\{ \begin{array}{ll} \beta_C = 6.5 \times 10^{-2} & \beta_E = 2.0 \times 10^{-2} \\ x_C(0) = 1.0 \times 10^{+4} & x_E(0) = 3.0 \times 10^{+3} \\ \kappa = 10 & \delta = 6.35 \times 10^{-6} \end{array} \right. \quad (20)$$

Os seguintes valores de parâmetros e condições iniciais podem produzir o cenário atual (os demais são exatamente os mesmos da tabela 1):

O valor de δ usado nesse cenário é δ^{***} , dado pela equação (18). Deve ser lembrado que $\psi = 0,65$ não é um parâmetro que podemos escolher. Porém, ele pode ser lido no resultado da simulação, já que é a razão de equilíbrio entre a população da Elite e dos Comuns. Ver a segunda equação em (17). Por outro lado, $\eta = 1/12$ é determinado pelas taxas de natalidade e mortalidade, assim como pelo coeficiente de desigualdade. Esses parâmetros são escolhidos para satisfazer (16), a condição necessária para atingir o equilíbrio em uma sociedade desigual.

Os mesmos comentários da seção 5.1.1 são válidos aqui, se escolhermos um δ inferior ao ótimo.

5.3.4 Sociedade Desigual: aproximação oscilatória do equilíbrio

Os valores de parâmetros e condições iniciais no cenário são apresentados na figura 6d são exatamente os mesmos que no cenário anterior, apresentado na figura 6c, exceto por δ . Ele é aumentado para $1,3 \times 10^{-5}$, quase $2\delta^{***}$. Isso resulta em uma Capacidade de Suporte muito menor comparada a 5.3.3, como pode ser visto comparando as figuras 6c e 6d. Portanto, a população final total no cenário atual é muito menor do que a população final total no cenário anterior, 5.3.3 (figura 6c).

6. Discussão dos Resultados

Nós conduzimos uma série de experimentos com o modelo HANDY, considerando primeiro uma sociedade igualitária sem Elites ($x_E = 0$), em seguida uma sociedade equitativa ($\kappa = 1$) em que Trabalhadores e Não-Trabalhadores são pagos igualmente e, finalmente, uma sociedade desigual onde as Elites consomem k vezes mais do que os Comuns. O modelo foi usado para encontrar um valor de equilíbrio sustentável e a capacidade máxima de suporte em cada um desses três tipos de sociedades.

6.1. Sociedade Desigual

O cenário que reflete com maior proximidade a realidade de nosso mundo hoje se encontra no terceiro grupo de experimentos (ver os cenários para uma sociedade desigual na seção 5.3), onde nós introduzimos estratificação econômica. Dentro dessas condições, concluímos que o colapso é difícil de evitar, o que ajuda a explicar porque a estratificação econômica é um dos elementos frequentemente encontrados em sociedades que colapsaram no passado. É importante ressaltar que, no primeiro desses cenários de sociedades desiguais, 5.3.1, *a solução parece estar em adotar uma via sustentável por um longo tempo*, mas mesmo usando uma taxa de esgotamento ideal (δ_*) e iniciando com um número muito pequeno de Elites, as Elites eventualmente consomem demais, resultando em escassez entre os Comuns, o que eventualmente provoca o colapso da sociedade. É importante notar que este colapso Tipo-T é *provocado por uma escassez induzida pela desigualdade que provoca uma perda de trabalhadores, em vez de um colapso da Natureza*. Apesar de parecer inicialmente ser a mesma coisa que a solução ideal sustentável obtida na ausência de Elites, a estratificação econômica altera o resultado final: o consumo das Elites continua a crescer até que a sociedade colapsa. O colapso Maia - em que a população nunca se recuperou, embora a natureza tenha se recuperado - é um exemplo de um colapso Tipo-T, enquanto que os colapsos na Ilha de Páscoa e no Crescente Fértil - onde a Natureza foi esgotada - são exemplos de um colapso Tipo-N.

No cenário 5.3.2, com uma taxa de esgotamento maior, o declínio dos Comuns ocorre mais rápido, enquanto as elites ainda estão prosperando, mas, ao final, os Comuns colapsam completamente, seguidos pelas Elites. É importante notar que, em ambos os cenários, as Elites - devido à sua riqueza - não sofrem os efeitos negativos do colapso ambiental até muito mais tarde do que os Comuns. Esta reserva de riqueza permite que as Elites continuem como se nada tivesse acontecido, apesar da catástrofe iminente. É provável que este seja um

importante mecanismo que ajudaria a explicar como colapsos do passado vieram a ocorrer por responsabilidade das Elites que parecem estar ignorando a trajetória catastrófica (mais evidente no caso Romano e Maia). Este efeito de atraso é reforçado pela trajetória longa e aparentemente sustentável percorrida antes do início do colapso. Enquanto alguns membros da sociedade podem soar o alarme alertando de que o sistema está se movendo em direção a um colapso iminente e, portanto, são necessárias mudanças estruturais para a sociedade, a fim de evitá-lo, as Elites e os seus apoiadores, que se opunham a fazer essas alterações, poderiam apontar para a longa e sustentável trajetória “até agora” em favor de não fazer nada.

Os dois cenários finais neste conjunto de experimentos, 5.3.3 e 5.3.4, são projetados para indicar os tipos de políticas necessárias para evitar este resultado catastrófico. Eles mostram que, no contexto da estratificação econômica, a desigualdade precisa ser muito reduzida e o crescimento da população tem de ser mantido abaixo dos níveis críticos, a fim de evitar um colapso social [Daly, 2008].

6.2. Sociedade Igualitária

Para entender melhor quais condições são necessárias para evitar o colapso, o nosso primeiro conjunto de experimentos modelou uma sociedade sem estratificação econômica e que começa com os valores de parâmetros que tornam possível chegar a uma capacidade máxima de suporte (cenário 5.1.1). Os resultados mostram que, na ausência de Elites, se o esgotamento per capita é mantido no nível ideal de δ_* , a população cresce harmoniosamente e se aproxima assintoticamente⁴ do nível de capacidade máxima de suporte. Isso produz uma aterrissagem suave até o equilíbrio nos níveis máximos sustentáveis de população e de produção.

Aumentar o fator de esgotamento ligeiramente (cenário 5.1.2) faz com que o sistema passe a oscilar, mas ainda assim chega a um equilíbrio sustentável, embora, de forma relevante, com uma menor capacidade de suporte. A população ultrapassa a capacidade de suporte, mas desde que essa ultrapassagem não seja excessiva – da ordem de grandeza da capacidade de suporte – a população sofre colapsos menores que podem causar oscilações e, eventualmente convergir para um equilíbrio sustentável. Assim, mesmo que distúrbios sociais e mortes possam ocorrer, um colapso total é evitado.

Um novo aumento no fator de esgotamento (cenário 5.1.3) faz o sistema passar por oscilações entre períodos de crescimento, ultrapassagens muito grandes e colapsos devastadores que quase exterminam a sociedade, mas a eventual recuperação da Natureza permite que o ciclo se repita.

Aumentando ainda mais o fator de esgotamento (cenário 5.1.4) o resultado é um colapso total do sistema. Isto mostra que apenas o esgotamento, se grande o suficiente, pode resultar em colapso – mesmo na ausência da estratificação econômica.

6.3. Sociedade Equitativa (com Trabalhadores e Não-Trabalhadores)

4 Chama-se de “aproximação assintótica” quando uma curva se aproxima lentamente de uma reta, sem jamais cortá-la; rigorosamente, a curva “encosta” na reta apenas em um tempo infinito.

Como o segundo conjunto de experimentos mostra (apresentado na seção 5.2), o HANDY nos permite modelar uma diversificada gama de arranjos sociais. Neste conjunto de experimentos, definir $x_E \geq 0$ e $\kappa = 1$ nos permitiu modelar uma situação que pode ser descrita como tendo Trabalhadores e Não-Trabalhadores, com o mesmo nível de consumo, ou seja, sem estratificação econômica. Os que não trabalham nesses cenários poderiam representar uma gama de papéis sociais como estudantes, aposentados e pessoas com deficiência, intelectuais, gestores e outros setores não-produtivos. Neste caso, os Trabalhadores têm de esgotar o suficiente da Natureza para sustentar tanto os Não-Trabalhadores quanto a si mesmos.

O primeiro cenário, 5.2.1, mostra que, mesmo com uma população de Não-Trabalhadores, a população total ainda pode alcançar um equilíbrio sustentável sem um colapso. No cenário 5.2.2, encontramos que o aumento do fator de esgotamento induz uma série de *ultrapassagens* e pequenos colapsos onde a população eventualmente converge para um equilíbrio sustentável inferior. Como em uma sociedade igualitária, o cenário 5.2.3 nos mostra que aumentar novamente o parâmetro de esgotamento resulta em ciclos de grandes *ultrapassagens*, grandes colapsos e eventual recuperação da Natureza. O cenário 5.2.4 nos mostra que aumentar ainda mais o esgotamento per capita pode produzir um colapso Tipo-N irreversível.

Finalmente, o cenário 5.2.5, que é uma réplica do 5.2.4 com uma relação muito maior de Não-Trabalhadores para Trabalhadores, mostra que um colapso em uma sociedade equitativa poderia ser evitado através da redução da média de esgotamento per capita. Notamos que esse cenário pode também representar uma situação em que, em vez de pagar Não-Trabalhadores, a carga de trabalho per capita é reduzida, com toda a população “trabalhando menos dias por semana”. Tal política de “partilha do trabalho” tem sido implementada com sucesso na Alemanha ao longo dos últimos anos para a redução do desemprego [Baker e Hasset, 2012; Hasset de 2009]. Além disso, Knight et al. [2012] mostra, através de uma análise do painel de dados para 29 países de alta renda da OECD de 1970 a 2010, que a redução do horário de trabalho pode contribuir para a sustentabilidade através da redução da pressão ecológica. Esta conclusão está de acordo com a nossa comparação entre os dois cenários, 5.2.5 e 5.2.4, apresentados acima.

6.4. HANDY e o modelo Brander-Taylor.

Como mencionado anteriormente, um uso semelhante da abordagem predador-presa foi aplicada no trabalho pioneiro de Brander e Taylor [1998] (BT) para estudar a histórica ascensão e queda da população da Ilha de Páscoa. Em comparação com o modelo deles, com apenas duas equações para População e Natureza, a introdução de Elites e Povo e Riqueza acumulada, resulta em uma maior variedade e espectro mais amplo de potenciais soluções. Além disso, o cenário de colapso apresentado em BT é um pouco diferente dos apresentados acima. Além disso, o cenário de colapso apresentado na figura 3 de BT parece ser mais uma aproximação oscilatória ao equilíbrio, semelhante ao mostrado na nossa figura 3b, e não um colapso no sentido que definimos neste artigo. Ademais, a capacidade de suporte, no sentido que definimos neste trabalho, é também diferente do que Brander e Taylor [1998] chamaram de capacidade de suporte. De fato, sua capacidade de suporte (K) é a nossa capacidade da Natureza, λ , que é o tamanho máximo que a Natureza pode chegar, enquanto Capacidade de Suporte no HANDY é o nível da população que pode ser suportada por um determinado nível de recursos naturais. Além do mais, a capacidade de suporte da BT é uma constante, enquanto

a Capacidade de Suporte no HANDY se ajusta de acordo com o nível de esgotamento da Natureza.

Ao compartilhar certas semelhanças com o modelo de Brander e Taylor, nossa estrutura de modelo mais complexa e o uso de diferentes suposições, permite que nosso modelo seja aplicado a vários tipos de sociedades com diferentes estruturas sócio-econômicas. Assim, ao contrário de pesquisas que tendem a estudar outras implicações do modelo bidimensional de BT [Anderies, 2000], o modelo que desenvolvemos apresenta um conjunto mais complexo de possíveis retroalimentações⁵ e dinâmicas não-lineares, e um maior espectro de resultados potenciais. Isso permite ao HANDY modelar um conjunto diferente e mais amplo de experimentos mentais.

Uma característica importante do HANDY que o distingue do Predador-Presa, BT, e outros modelos similares [Anderies, 1998; Dalton et al, 2005.; Erickson e Gowdy, 2000; Reuveny e Decker, 2000] é a sua capacidade intrínseca de produzir colapsos irreversíveis devido à estrutura de acumulação de riqueza. Nossa abordagem também difere de modelos como D'Alessandro [2007] que pode produzir colapsos irreversíveis, mas apenas através da introdução explícita de um mecanismo de densidade populacional crítica no modelo. As dinâmicas produzidas pelo HANDY oferecem a possibilidade de colapsos irreversíveis, sem ter que introduzir um mecanismo adicional ao modelo. Consulte a seção 5.1.4 para uma explicação de colapsos irreversíveis no HANDY.

7. Sumário

O colapso de muitas civilizações avançadas já ocorreu muitas vezes nos últimos cinco mil anos, e eles frequentemente vieram após séculos de declínio populacional e cultural, e de regressão econômica. Embora muitas causas diferentes tenham sido usadas para explicar colapsos individuais, ainda é necessário desenvolver uma explicação mais geral. Neste artigo procura-se construir um modelo matemático simples para explorar as dinâmicas essenciais da interação entre a população e os recursos naturais. Ele compreende as duas características que parecem surgir em todas as sociedades que entraram em colapso: o esgotamento de recursos devido à tensão colocada sobre a capacidade de suporte ecológico e a divisão da sociedade em Elites (ricos) e Comuns (pobres).

O HANDY foi inspirado no modelo Predador e Presa, com a população humana agindo como o predador e a natureza sendo a presa. Quando pequena, a Natureza cresce exponencialmente com um coeficiente de regeneração γ , mas satura em um valor máximo λ . Como resultado, a regeneração máxima da natureza ocorre em $\lambda/2$, não no nível de saturação λ . Os Comuns produzem riqueza a uma taxa δ de esgotamento per capita, e o esgotamento também é proporcional à quantidade de natureza disponível. Esta produção é guardada como riqueza acumulada, que é usada pelas Elites para pagar aos Comuns um salário de subsistência, s , e pagar a si mesmos ks , onde k é o coeficiente de desigualdade. As populações de Elites e Comuns crescem com uma taxa de natalidade β e morrem com uma taxa de mortalidade α que se mantêm em um nível baixo saudável quando há alimento suficiente acumulado (riqueza). No entanto, quando a população aumenta e a riqueza diminui, a taxa de mortalidade aumenta até um nível de fome, levando à diminuição da população.

5 “Feedbacks”, quando o efeito de uma mudança no sistema intensifica (retroação positiva) ou amortece (retroação negativa) este efeito. (N.T.).

Mostramos como a capacidade de suporte – a população que pode ser indefinidamente sustentada por um determinado ambiente [Catton, 1980] – pode ser definida no modelo HANDY como a população cujo consumo total está em um nível que é igual ao que a natureza pode regenerar. Sendo a regeneração máxima da Natureza quando $y = \lambda/2$, nós podemos encontrar o nível ideal de esgotamento (produção) per capita, δ_* em uma sociedade igualitária onde $x_E \equiv 0$, $\delta_{**} (\geq \delta_*)$ e uma sociedade equitativa onde $\kappa \equiv 1$, e δ_{***} em uma sociedade desigual, onde $x_E \geq 0$ e $\kappa > 1$.

Em suma, os resultados de nossos experimentos, discutidos no capítulo 6, indicam que qualquer uma das duas características aparentes em colapsos sociais históricos – super-exploração dos recursos naturais e forte estratificação econômica – podem resultar de forma independente em um colapso completo. Dada a estratificação econômica, o colapso é muito difícil de evitar e requer mudanças políticas importantes, incluindo grandes reduções na desigualdade e nas taxas de crescimento da população. Mesmo na ausência de estratificação econômica, o colapso ainda pode ocorrer se o esgotamento *per capita* for muito alto. No entanto, o colapso pode ser evitado e a população pode alcançar o equilíbrio se a taxa *per capita* de esgotamento da natureza for reduzida a um nível sustentável, e se os recursos forem distribuídos de forma razoavelmente equitativa.

Nas próximas gerações do HANDY, pretendemos desenvolver várias extensões, incluindo: **(1)** a desagregação da Natureza em estoques não-renováveis, estoques em regeneração e fluxos renováveis, bem como a introdução de um mecanismo de investimento na acessibilidade dos recursos naturais, a fim de estudar o efeito do investimento em tecnologia na escolha de recursos e na eficiência produtiva; **(2)** tornando a desigualdade endógena à estrutura do modelo; **(3)** a introdução de “políticas” que possam modificar os parâmetros, tais como o esgotamento, o coeficiente de desigualdade, a taxa de natalidade; e, **(4)** a introdução de várias regiões acopladas para representar os países com políticas diferentes, trocas de capacidade de suporte e guerras por recursos.

Quem tiver interesse em obter o código do modelo pode entrar em contato com os autores.

Reconhecimento

Somos gratos aos professores Matthias Ruth, Victor Yakovenko, Herman Daly, Takemasa Miyoshi, Jim Carton, Fernando Miralles-Wilhelm, Ning Zeng, e Drs. Robert Cahalan and Steve Penny pelas muito uteis discussões. Estudo dos cenários das “Sociedade Equitária” (i.e., com Trabalhadores e Não-Trabalhadores), o cenário apresentado na seção 5.2.5, em particular, foi sugerida por V. Yakovenko. Gostariamos também de agradecer nosso revisor anônimo n.1 por ter destacado para nós a importância da capacidade do HANDY de naturalmente produzir colapsos irreversíveis, o que não havia sido encontrado nos modelos anteriores. Gostariamos de agradecer especialmente os editores desta revista científica nos alertando para o modelo e obra realizada por Brander e Taylor, que desconhecíamos, e que nos permitiu revisar nosso artigo levando em conta estas novas informações.

Este trabalho foi parcialmente financiado através da NASA/GSFC grant NNX12AD03A.

Referências Bibliográficas

Wilhelm Abel. Agricultural Fluctuations in Europe: From the Thirteenth to the Twentieth Cen-

turies. Methuen, 1980.

John M Anderies. Culture and human agro-ecosystem dynamics: the Tsembaga of New Guinea. *Journal of Theoretical Biology*, 192(4):515{530, 1998.

John M. Anderies. On modeling human behavior and institutions in simple ecological economic systems. *Ecological Economics*, 35(3):393{412, December 2000.

Dean Baker and Kevin Hassett. The human disaster of unemployment, May 2012. URL <http://www.nytimes.com/2012/05/13/opinion/sunday/the-human-disaster-of-unemployment.html?pagewanted=all>.

Anand Banerjee and Victor M. Yakovenko. Universal patterns of inequality. *New Journal of Physics*, 12(7), July 2010.

James A. Brander and M. Scott Taylor. The simple economics of Easter Island: A Ricardo-Malthus model of renewable resource use. *The American Economic Review*, 88(1):119{138, 1998.

Robert Brenner. Agrarian class structure and economic development in pre-industrial Europe. In Trevor H. Aston and C. H. E. Philpin, editors, *The Brenner Debate: Agrarian Class Structure and Economic Development in Pre-Industrial Europe*, pages 10{63. Cambridge University Press, 1985.

William R. Catton. *Overshoot: The Ecological Basis of Revolutionary Change*. University of Illinois Press, 1980.

Christopher Chase-Dunn and Thomas Hall. *Rise and Demise: Comparing World-Systems*. Westview Press, 1997.

C. Y. Cyrus Chu and Ronald D. Lee. Famine, revolt, and the dynastic cycle: Population dynamics in historic China. *Journal of Population Economics*, 7(4):351{378, November 1994.

Joel E. Cohen. *How Many People Can the Earth Support?* W. W. Norton & Company, 1995.

T. Patrick Culbert, editor. *The Classic Maya collapse*. University of New Mexico Press, 1973.

Simone D'Alessandro. Non-linear dynamics of population and natural resources: The emergence of different patterns of development. *Ecological Economics*, 62(3):473{481, 2007.

Thomas R Dalton, R Morris Coats, and Badiollah R Asrabadi. Renewable resources, propertyrights regimes and endogenous growth. *Ecological Economics*, 52(1):31{41, 2005.

Herman E Daly. *Steady-state economics: with new essays*. Island Press, 1991.

Herman E. Daly. *Beyond growth: the economics of sustainable development*. Beacon Press, 1996.

Herman E. Daly. A steady-state economy, April 2008. URL http://www.sd-commission.org.uk/data/files/publications/Herman_Daly_thinkpiece.pdf.

Herman E. Daly and Joshua Farley. *Ecological Economics: Principles And Applications*. Island Press, 2003.

Arthur Demerest, Prudence Rice, and Don Rice, editors. *The Terminal Classic in the Maya Lowlands*. University Press of Colorado, 2004.

Jared M. Diamond. *Collapse: How Societies Choose to Fail Or Succeed*. Viking Press, 2005.

Adrian A. Dragulescu and Victor M. Yakovenko. Exponential and power-law probability distributions of wealth and income in the United Kingdom and the United States. *Physica A*, 299:213-221, 2001.

Iorwerth Eiddon Stephen Edwards, Cyril John Gadd, and Nicholas Geoffrey Lempriere Hammond, editors. *The Cambridge Ancient History, Vol. I, Part 2: Early History of the Middle East*. Cambridge University Press, 1971.

Iorwerth Eiddon Stephen Edwards, Cyril John Gadd, Nicholas Geoffrey Lempriere Hammond, and Edmond Sollberger, editors. *The Cambridge Ancient History, Vol. II, Part 1: The Middle East and the Aegean Region*. Cambridge University Press, 1973.

Jon D Erickson and John M Gowdy. Resource use, institutions, and sustainability: a tale of two Pacific Island cultures. *Land Economics*, pages 345-354, 2000.

Joshua Goldstein. *Long Cycles: Prosperity and War in the Modern Age*. Yale University Press, 1988.

Jack A. Goldstone. *Revolution and Rebellion in the Early Modern World*. University of California Press, 1991.

Lorna A. Greening, David L. Greene, and Carmen Di Giulio. Energy efficiency and consumption | the rebound effect | a survey. *Energy Policy*, 28(67):389-401, 2000.

Kevin Hassett. U.S. should try Germany's unemployment medicine, November 2009. URL <http://www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=ax3kyE3bILDY>.

Ibn Khaldun. *The Muqaddimah: An Introduction to History*. Pantheon Books, 1958. Translated from the Arabic (ca 1390) by Franz Rosenthal.

Michael Jansen, Maire Mulloy, and Godelinter Urban, editors. *Forgotten cities on the Indus: early civilization in Pakistan from the 8th to the 2nd millennium BC*. Verlag Philipp von Zabern, 1991.

Daniel M. Kammen. Preindustrial human environmental impacts: Are there lessons for global change science and policy? *Chemosphere*, 29(5), September 1994.

Jonathan Kenoyer. *Ancient Cities of the Indus Valley Civilization*. Oxford University Press, 1998.

Kyle W. Knight, Eugene A. Rosa, and Juliet B. Schor. Could working less reduce pressures on the environment? a Cross-National panel analysis of OECD countries, 1970-2007, 2012. under review.

Nikolai Dmitrievich Kondratie_. The long wave cycle. Richardson & Snyder, 1984.

Emmanuel Le Roy Ladurie. The French Peasantry, 1450-1660. University of California Press, 1987.

J. S. Lee. The periodic recurrence of internecine wars in China. The China Journal, 14(3):111{163, March-April 1931.

David Lentz, editor. Imperfect Balance: Landscape Transformation in the Precolumbian Americas. Columbia University Press, 2000.

Alfred J. Lotka. Elements of Physical Biology. Williams and Wilkins, 1925.

Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, J_rgen Randers, and William W. Behrens III. The Limits to Growth. Universe Books, 1972.

Richard E. Mitchell. Patricians and plebeians: the origin of the Roman state. Cornell University Press, 1990.

George Modelski. Exploring Long Cycles. L. Rienner Publishers, 1987.

Ian Morris. The collapse and regeneration of complex society in Greece, 1500{500 BC. In Glenn

M.Schwartz and John J. Nichols, editors, After Collapse: The Regeneration of Complex Societies. University of Arizona Press, 2006.

Joseph Needham and Ling Wang. Science and Civilisation in China: Introductory Orientations. Cambridge University Press, 1956.

Jack Parsons. Population control and politics. Population and Environment, 12(4):355{377, June 1991.

John M. Polimeni, Kozo Mayumi, Mario Giampietro, and Blake Alcott. The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements. Earthscan, 2008.

Clive Ponting. A green history of the world: the environment and the collapse of great civilizations. Penguin Books, 1991.

Michael M. Postan. Medieval agrarian society in its prime: 7. England. In Michael M. Postan, editor, The Cambridge Economic History of Europe, Vol. 1: The Agrarian Life of the Middle Ages, pages 221{246. Cambridge University Press, 1966.

Charles L. Redman, editor. Human Impact on Ancient Environments. University of Arizona Press, 1999.

Charles L. Redman, Steven James, Paul Fish, and J. Daniel Rogers, editors. *The Archaeology of Global Change: The Impact of Humans on Their Environment*. Smithsonian Books, 2004.

Rafael Reuveny and Christopher S. Decker. Easter Island: historical anecdote or warning for the future? *Ecological Economics*, 35(2):271{287, 2000.

Matthias Ruth. The nature of the beast and the beast in nature: broadening the perspective of technology. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 29(5):374{382, 2009.

Stephen Shennan, Sean S. Downey, Adrian Timpson, Kevan Edinborough, Sue Colledge, Tim Kerig, Katie Manning, and Mark G. Thomas. Regional population collapse followed initial agriculture booms in mid-Holocene Europe. *Nature Communications*, 4, 2013. doi:10.1038/ncomms3486.

Miriam T. Stark. From Funan to Angkor: Collapse and regeneration in ancient Cambodia. In Glenn M. Schwartz and John J. Nichols, editors, *After Collapse: The Regeneration of Complex Societies*. University of Arizona Press, 2006.

Joseph A. Tainter. *The Collapse of Complex Societies*. Cambridge University Press, 1988.

Romila Thapar. *Early India: From the Origins to Ad 1300*. University of California Press, 2004.

Peter Turchin. *Historical Dynamics: Why States Rise and Fall*. Princeton University Press, 2003.

Peter Turchin. Dynamical feedbacks between population growth and sociopolitical instability in agrarian states. *Structure and Dynamics*, 1(1), 2005.

Peter Turchin. *War and Peace and War: The Life Cycles of Imperial Nations*. Pi Press, 2006.

Peter Turchin and Sergey A. Nefedov. *Secular Cycles*. Princeton University Press, 2009.

Vito Volterra. Variazioni e uttuazioni del numero dindividui in specie animali conviventi. *Memoria Accademia dei Lincei Roma*, 2:31{113, 1926}.

David Webster. *The Fall of the Ancient Maya*. Thames and Hudson, 2002.

James W. Wood. A theory of preindustrial population dynamics demography, economy, and wellbeing in Malthusian systems. *Current Anthropology*, 39(1):99{135, February 1998.

Ronald Wright. *A Short History of Progress*. House of Anansi Press, 2004.

Norman Yoffee. The decline and rise of Mesopotamian civilization: An ethnoarchaeological perspective on the evolution of social complexity. *American Antiquity*, 44(1):5{35, January 1979.

Norman Yoffee and George L. Cowgill. *The Collapse of Ancient States and Civilizations*. University of Arizona Press, 1988.