

SISTEMAS AGRÁRIOS, SISTEMAS COMPLEXOS  
(Seção III: Abordagem sistêmica em processos produtivos)

Patricia Eveline dos Santos<sup>1</sup>

Angélica de Oliveira<sup>2</sup>

Benedito Silva Neto<sup>3</sup>

**Resumo**

Neste trabalho procurou-se evidenciar possíveis contribuições que conceitos relacionados à noção de complexidade podem proporcionar ao avanço da compreensão da dinâmica de sistemas agrários. Após uma breve revisão de alguns conceitos relacionados aos sistemas complexos, foram discutidas as características gerais de um sistema de derrubada e queimada e elaborado um modelo de simulação deste tipo de sistema agrário. Os resultados obtidos a partir das simulações foram então interpretados considerando-se também algumas características mais gerais da dinâmica dos sistemas agrários descritas na literatura. A possibilidade dos sistemas agrários de derrubada e queimada de apresentar criticalidade auto-organizada foi claramente evidenciada. Além disto, os conceitos relacionados à complexidade mostraram-se bastante promissores para a interpretação da dinâmica de outros sistemas agrários. O trabalho evidencia a possibilidade dos conceitos relacionados à complexidade virem a se constituir em um quadro teórico interessante para a compreensão dos processos de evolução histórica e de diferenciação geográfica da agricultura.

**Palavras chave:** complexidade, evolução da agricultura, simulação de sistemas dinâmicos, criticalidade auto-organizada

**Abstract**

The objective of this paper is to explore the possible contributions that concepts related to the complexity notion can provide for the understanding of the behavior of the agrarian systems. After one revision of some concepts related to the complex systems, the general characteristics of a forest fire system and a model of simulation of this type of agrarian system

---

<sup>1</sup> Bacharel em Economia, acadêmica do Programa de Mestrado em Desenvolvimento da UNIJUI, e-mail: patriciaeveline@gmail.br

<sup>2</sup> Eng. Agrônoma, técnica de pesquisa do Departamento de Estudos Agrários da UNIJUI. e-mail: angelica.oliveira@unijui.edu.br

<sup>3</sup> Doutor em Desenvolvimento Agrícola pelo Institut National Agronomique de Paris-Grignon, professor dos Programas de Mestrados em Modelagem Matemática e em Desenvolvimento da UNIJUI, e-mail: bsneto@unijui.edu.br

was made. The results of the simulations were interpreted considering also some more general characteristics of the dynamics of the agrarian systems. The possibility of the forest fire agrarian system to present self organized criticality clearly was evidenced. Moreover, the concepts related to the complexity had revealed promising for the interpretation of the dynamics of other agrarian systems. In this direction, the paper evidences the possibility of the concepts related to the complexity to come to constitute an interesting theoretical framework for the understanding of the processes of historical evolution and geographic differentiation of agriculture.

**Key-words:** complexity, agriculture evolution, dynamic systems simulation, self organized criticality.

## **Introdução**

O conceito de sistema agrário vem sendo desenvolvido por meio de uma abordagem sistêmica evolução histórica e da diferenciação geográfica da agricultura (Mazoyer & Roudart, 1998; Silva Neto & Basso, 2005). Este conceito pode ser aplicado com objetivos específicos os mais diversos, que vão desde estudos puramente acadêmicos até a definição de intervenções para a promoção do desenvolvimento. Nestes estudos fica claro que a grande diversidade da dinâmica dos sistemas agrários deve-se ao seu caráter complexo e evolutivo (Silva Neto, 2005). No entanto, poucos são os autores que tem procurado estabelecer uma relação mais direta entre a interpretação da evolução da agricultura baseada no conceito de sistemas agrários e os resultados de estudos mais recentes sobre a complexidade.

O objetivo deste trabalho é o de explorar estas relações, procurando evidenciar as possíveis contribuições que certos conceitos relacionados à noção de complexidade podem proporcionar a compreensão do comportamento dos sistemas agrários. Para tanto, foi elaborado um modelo de simulação de um sistema agrário de derrubada e queimada. Os resultados obtidos a partir de simulações efetuadas com este modelo foram então interpretados considerando-se também algumas características mais gerais da dinâmica dos sistemas agrários, descritas por Mazoyer & Roudart (1998).

O trabalho foi dividido em cinco partes. Inicialmente, a problemática a ser analisada no trabalho é desenvolvida por meio da discussão de alguns conceitos potencialmente úteis para a interpretação dos sistemas agrários como sistemas complexos. Na segunda parte, a dinâmica de um sistema agrário de derrubada e queimada é brevemente caracterizada. Na terceira parte é descrito o modelo de simulação. Na terceira parte é realizada uma discussão

dos resultados obtidos nas simulações, sendo que, na quarta parte, esta discussão é ampliada para uma interpretação dos mecanismos de evolução dos sistemas agrários de derrubada e queimada e de outros sistemas agrários posteriores. Na quinta parte do trabalho, é realizada uma interpretação dos resultados obtidos a partir de conceitos relacionados à complexidade.

### Sistemas complexos

Os sistemas complexos, em geral, se caracterizam pela presença de bifurcações (Gribbin, 2004, p. 149). Um sistema complexo pode apresentar vários comportamentos que vão desde o equilíbrio até o caos-determinista, passando por ciclos limite com um número crescente de pontos, de acordo com o valor de um, ou mais, parâmetros. Os valores assumidos por tais parâmetros na fronteira entre um ciclo limite e outro, ou entre um ciclo limite e o caos-determinista, definem um ponto de bifurcação. A figura 1 ilustra, esquematicamente, uma bifurcação.

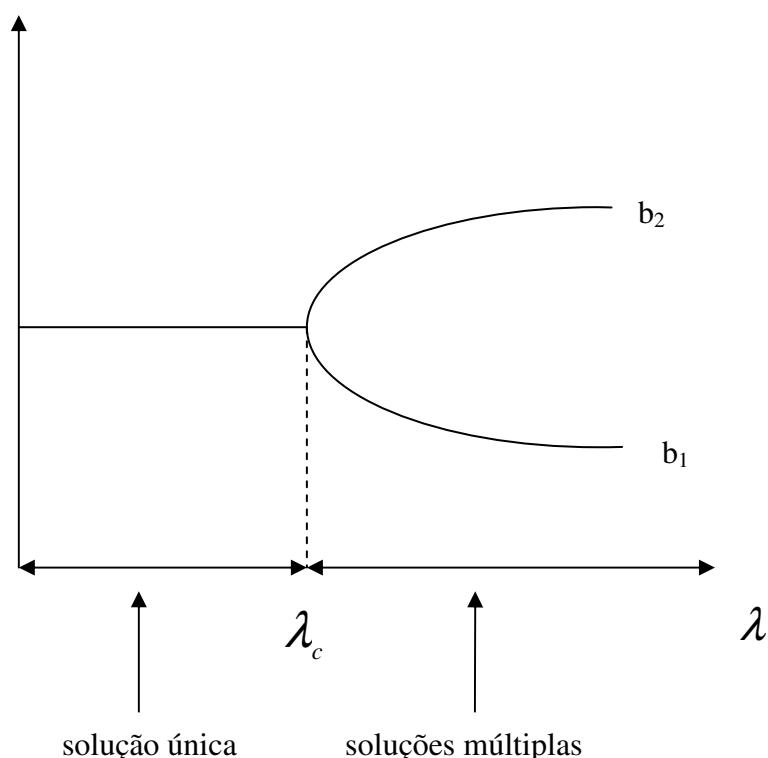


Figura 1 – Exemplo de ponto de bifurcação

Fonte: Prigogine (1994)

Conforme mostrado na figura 1, antes do parâmetro  $\lambda$  atingir o valor  $\lambda_c$ , o sistema apresenta apenas uma solução, encontrando-se em equilíbrio. Porém, no ponto  $\lambda_c$ , o sistema

passa a apresentar soluções múltiplas. Assim, a partir de um ponto de bifurcação, um mesmo valor de  $\lambda$  está associado a mais do que um estado do sistema. Prigogine (1993) salienta que quando um sistema se localiza longe de um ponto de bifurcação o seu comportamento é regido, fundamentalmente, pelas leis deterministas que definem o seu atrator, mas, em um ponto de bifurcação, a trajetória futura de um sistema é definida pelas suas flutuações. Esta é a base do conceito de “ordem por flutuação”, discutido por Prigogine e seus colaboradores (Prigogine, 2004; Prigogine e Stengers, 1986).

Por exemplo, a partir do ponto  $\lambda_c$ , pode haver certa probabilidade do sistema mostrado na figura 1 tomar a trajetória  $b_1$  ou  $b_2$ . Ao tomar uma trajetória o sistema pode continuar deterministicamente sua evolução na medida em que  $\lambda$  aumenta até atingir um novo ponto de bifurcação. E se o processo for repetido, o sistema poderá tomar outra trajetória. Esta combinação entre determinismo e não determinismo caracteriza a evolução dos sistemas complexos presentes na biosfera como processos abertos.

Prigogine e Stengers (1986) sustentam que, dependendo da natureza das flutuações apresentadas pelo sistema, é possível afirmar que há momentos em que uma flutuação é “escolhida”. A amplificação desta flutuação então desestabiliza o sistema que toma uma nova trajetória. Os autores argumentam que tal escolha, embora definida a partir da atividade intrínseca do sistema, escapa a qualquer controle definido pelas suas condições de contorno. É neste sentido que Prigogine (2004) afirma que a evolução dos sistemas complexos presentes na biosfera é um processo essencialmente criativo.

A presença de bifurcações implica em uma indeterminação na relação entre estrutura e estado do sistema, pois indica que mais do que um estado pode ser associado a uma mesma estrutura, representada na figura 1 pelo parâmetro  $\lambda$  (Prigogine, 1997).

Matematicamente, para que um sistema possa exibir bifurcações pelo menos parte dos seus componentes deve apresentar relações não lineares. Porém, nem todas as relações não lineares geram bifurcações. Neste sentido, as relações não lineares mais importantes são as longitudinais<sup>4</sup>, as quais também são chamadas relações recursivas ou retro-alimentações, ou seja, aquelas que traduzem o efeito de uma variável sobre si mesma ao longo do tempo.

As relações não lineares são também responsáveis pela alta sensibilidade às condições iniciais apresentadas por sistemas com comportamento caótico-determinista. A partir de dois

---

<sup>4</sup> As variáveis de um sistema podem apresentar também relações não lineares funcionais, as quais ocorrem entre duas ou mais variáveis simultaneamente.

estados iniciais distintos, dois sistemas idênticos com comportamento caótico-determinista apresentarão uma divergência exponencial de suas trajetórias (Brown, 1997). Assim, dois sistemas com comportamento caótico-determinista, inicialmente em estados muito próximos, após certo período se encontrarão em estados muito diferentes.

A alta sensibilidade às condições iniciais torna imprevisível a trajetória dos sistemas com comportamento caótico-determinista, pelo menos no longo prazo, mesmo se todos os mecanismos responsáveis pelas suas transformações forem perfeitamente conhecidos em virtude da impossibilidade do estado de um sistema ser medido com precisão infinita (Brown, 1997).

Certas relações não lineares originam interações entre os componentes do sistema gerando assim propriedades do mesmo que não podem ser explicadas apenas pelos atributos dos seus componentes, quando considerados de forma isolada. Tais propriedades, que explicam o clássico enunciado de Bertalanfy (1968) de que um sistema é maior do que a soma das suas partes, são denominadas "propriedades emergentes", sendo uma das características mais importantes dos sistemas complexos.

Os sistemas complexos presentes na biosfera terrestre, inclusive as sociedades humanas, são denominados por Prigogine e seus colaboradores de estruturas dissipativas, para enfatizar o fato desses sistemas se manterem longe do equilíbrio termodinâmico por meio da dissipação de energia (Prigogine, 1977). As mudanças provocadas por uma perturbação são cruciais na definição da trajetória de uma estrutura dissipativa quando esta se encontra em um ponto de bifurcação. É que, se um sistema tem sua trajetória alterada em um ponto de bifurcação, tal alteração se manterá ou mesmo será amplificada, alterando assim os estados futuros do sistema, inclusive as suas formas de organização. Isto torna as estruturas dissipativas sistemas essencialmente evolutivos. Além disto, as perturbações também são importantes para a evolução dos sistemas dissipativos porque é a partir delas que pode ocorrer a geração de componentes novos, os quais podem se incorporar a sua estrutura, alterando o seu processo de auto-organização.

Como mencionado acima, Prigogine e seus colaboradores (Prigogine, 2004; Prigogine e Stengers, 1986) utilizam a expressão "ordem por flutuação" para designar os processos de organização em que perturbações podem afetar de forma desproporcional à sua dimensão a trajetória do sistema. Segundo estes autores a ordem por flutuação é responsável pelo caráter intrinsecamente histórico e evolutivo das estruturas dissipativas da biosfera. No entanto, vale salientar, como destaca Prigogine (2004), que a ocorrência de ordem por flutuação significa

que os processos evolutivos característicos das estruturas dissipativas não ocorrem apenas em resposta a estímulos do meio, mas são processos essencialmente criativos, mesmo quando se trata de sistemas que não estão sujeitos à ação humana.

A propriedade de certos sistemas complexos, segunda a qual estes tendem espontaneamente a um ponto de bifurcação, a partir do qual seu comportamento ao longo do tempo muda drasticamente, é denominada “criticalidade auto-organizada” (Per Bak & Chen, 1991). O comportamento dos sistemas que apresentam criticalidade auto-organizada apresenta um caráter cíclico, embora não periódico, isto é, o momento e a amplitude das mudanças são muito variáveis, sendo imprevisíveis. É interessante observar que a criticalidade auto-organizada tem sido observada em fenômenos relacionados a sistemas de natureza muito diferentes, como avalanches em montes de areia (Per Bak & Chen, 1991), terremotos (Hannon & Ruth, 1997), inovações tecnológicas em sistemas econômicos (Kauffman, 1995), aparecimento e extinção de espécies biológicas (Kauffman, 1995).

Os trabalhos organizados por Gunderson e Holling (2002) discutem duas características importantes da evolução de muitos sistemas ecológicos e sociais. A primeira delas é que a criticalidade auto-organizada de tais sistemas muitas vezes leva-os a apresentar mudanças que caracterizam fases de acumulação, conservação, crise e reorganização (Holling e Gunderson, 2002). Os autores destacam também a diversidade das dimensões espaço-temporais dos sistemas que compõem a biosfera, com os sistemas de maior abrangência espacial normalmente apresentando ciclos mais longos. Além disto, os autores salientam as diversas interações existentes entre tais sistemas, na medida em os de menor dimensão espaço-temporal em geral constituem-se em componentes de sistemas de maior dimensão. Assim, o caráter cíclico e a alta interdependência apresentada pelos sistemas complexos que compõem a biosfera lhes conferem um grau de complexidade muito maior do que o normalmente apreendido a partir do seu estudo isolado (Holling et al., 2002). Por esta razão o conceito de "panarquia" (em oposição à "hierarquia") tem sido utilizado para salientar a complexidade das relações entre os sistemas que compõe a biosfera terrestre (Gunderson e Holling, 2002).

Os elementos brevemente sintetizados acima evidenciam uma convergência entre a abordagem da agricultura em termos de sistemas agrários e a noção de complexidade. Assim, a interpretação dos sistemas agrários como sistemas complexos auto-organizados pode ser sustentada a partir, por exemplo, da visão evolutiva da agricultura defendida pela abordagem de sistemas agrários e pela ênfase que esta abordagem confere à análise das interações entre

os agentes locais no processo de desenvolvimento. Na obra de Mazoyer & Roudart (1998) também se pode perceber a importância central das relações sociais nos processos de inovação responsáveis pelo surgimento de novos sistemas agrários. Neste sentido pode-se argumentar, por exemplo, que a relativa pacificação da Europa Ocidental que permitiu o estabelecimento de relações sociais mais estáveis pode ter desempenhado um papel fundamental para a adoção em larga escala das técnicas que deram origem a Revolução Agrícola que marcou o final da Alta Idade Média. Um outro exemplo que pode ser invocado foi o papel da instituição da propriedade privada, a qual, em algumas regiões da Europa Ocidental, permitiu a disseminação dos sistemas de rotação de culturas que levaram à Primeira Revolução Agrícola dos Tempos Modernos (Mazoyer & Roudart, 1998).

Porém, em que pese esses argumentos, cabe a pergunta: em que condições um sistema agrário pode ser caracterizado como um sistema complexo? As assimetrias entre causas e efeitos características de relações não lineares relacionadas à complexidade podem ser evidenciadas em um sistema agrário? Em que condições os sistemas agrários poderiam apresentar as bifurcações típicas dos sistemas complexos? Os sistemas agrários apresentam algum tipo de criticalidade auto-organizada ou panarquia? Seriam estes conceitos logicamente plausíveis para a interpretação da dinâmica dos sistemas agrários? Em suma, que tipo de contribuição os conceitos relacionados à complexidade podem proporcionar à reflexão sobre os mecanismos de evolução dos sistemas agrários?

Neste artigo procuramos contribuir para responder a essas questões por meio da modelagem de um sistema agrário cuja estrutura é relativamente simples: o sistema agrário de derrubada e queimada.

### **Os sistemas agrários de derrubada e queimada**

Originado como uma transformação das primeiras formas de agricultura desenvolvidas pelo homem durante a Revolução Neolítica, os sistemas agrários de derrubada e queimada são tipicamente florestais. Assim, por meio da derrubada e, após um período de secagem natural, a queima dos restos vegetais, os nutrientes acumulados na grande quantidade de biomassa, característica desses ecossistemas, são disponibilizados às culturas. Dessa forma a agricultura pode se estabelecer mesmo sobre solos relativamente pobres, desde que as culturas sejam precedidas por um período suficientemente longo para que a biomassa acumule os nutrientes necessários à sustentação de um próximo ciclo cultural. Como as florestas se constituem de plantas com baixa capacidade de colonização, a ocorrência de plantas invasoras nos primeiros

anos de cultura é muito baixa. Tal característica, aliada à grande eficiência da queimada na eliminação da vegetação espontânea, torna os sistemas agrários de derrubada e queimada pouco exigentes em trabalho (Boserup, 1987). Além disso, estes sistemas agrários podem ser praticados com um mínimo de meios de produção, cuja fabricação pode ser realizada até sem o conhecimento da metalurgia. Em suma, os sistemas agrários de derrubada e queimada constituem-se em formas de agricultura com produtividades do trabalho relativamente elevadas, pouco exigentes em técnicas para a confecção de ferramentas, que podem ser realizadas com um mínimo de meios de produção e bastante eficientes na mobilização da fertilidade natural dos ecossistemas florestais, o que os torna altamente sustentáveis, sob condições sociais adequadas (como livre acesso à terra e densidades demográficas relativamente baixas). Portanto, não é de se admirar que os sistemas agrários de derrubada e queimada estão entre as formas de agricultura que mais se disseminaram no mundo, sendo ainda hoje encontrados (Dufumier, 2004).

### **Modelo de simulação de um sistema de derrubada e queimada**

Para analisar a dinâmica de um sistema de derrubada e queimada construímos um modelo de simulação no programa STELLA (STELLA Systems, 1997). A dinâmica geral do sistema é mostrada na figura 2.

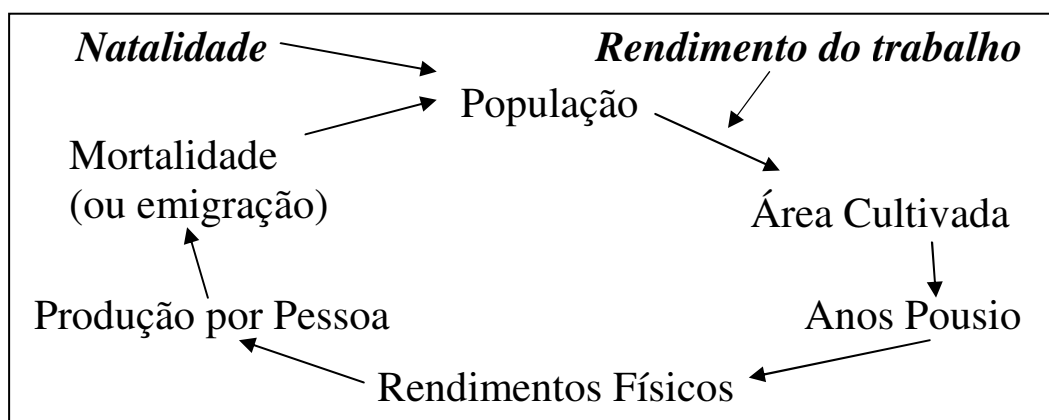


Figura 2. Dinâmica geral de um sistema de derrubada e queimada.



De acordo com diagrama mostrado na figura 2 foi elaborado o código do programa no aplicativo STELLA, o qual se encontra descrito a seguir:

```

Populacao(t) = Populacao(t - dt) + (Cresc_Pop - No_Mortos) * dt
INIT Populacao = 100
Cresc_Pop = Populacao*TM
No_Mortos = Populacao*Mortalidade
Rendimento_Final(t) = Rendimento_Final(t - dt) + (Rendimento - Rend_passado) * dt
INIT Rendimento_Final = 2000
Rendimento =
(-0.054337338*Anos_pousio^3+2.949082159*Anos_pousio^2+18.97645501*Anos_pousio)
*RANDOM((1-Variacao_aleatoria_do_rend_cultura),
(1+Variacao_aleatoria_do_rend_cultura))
Rend_passado = DELAY(Rendimento,1,2000)
Anos_pousio = IF ((Area_Total/Area_Cultivada)-1)>40 THEN 40 ELSE
Area_Total/Area_Cultivada-1
Area_Cultivada = IF Area_Cult_Maxima<Area_Total THEN
(IF(Populacao*200)/Rendimento_Final<Area_Cult_Maxima THEN
(Populacao*200)/Rendimento_Final ELSE Area_Cult_Maxima) ELSE Area_Total
Area_Cult_Maxima = Populacao*Rendimento_do_Trabalho
Area_Total = 2500
Mortalidade = 3.11052E-05*Prod_por_pessoa^2-0.0125853*Prod_por_pessoa+1.272852891
Mortalidade_p100 = Mortalidade*100
Pessoas_p_Km2 = Populacao/(Area_Total/100)
Pop_ano_anterior = DELAY(Populacao,1)
Prod_por_pessoa = (Rendimento_Final*Area_Cultivada)/Populacao
Rendimento_do_Trabalho = .1
Taxa_de_crescim_demog% = 0.5
TM = Taxa_de_crescim_demog%/100
Variacao_aleatoria_do_rend_cultura = 0

```

Este modelo descreve fundamentalmente a dinâmica de uma população que se alimenta de uma cultura cujo rendimento físico é assegurado por um período de pousio florestal. A área cultivada e, portanto, a duração do período de pousio, são definidos pela

densidade demográfica, considerando-se uma determinada necessidade de alimentos por pessoa e uma área máxima que cada pessoa é capaz de cultivar. O rendimento físico da cultura é inversamente proporcional à duração do período de pousio. Considera-se que a população cresce a uma determinada taxa básica, a qual é fixada considerando-se uma disponibilidade de alimentos suficiente para satisfazer plenamente as necessidades de toda a população. Caso o sistema não seja capaz de fornecer todo o alimento necessário por pessoa fixado, a taxa de mortalidade<sup>5</sup> se eleva progressivamente.

### **Resultados das Simulações**

Em primeiro lugar é interessante observarmos como pode ser definida a população que este sistema é capaz de sustentar. Os parâmetros utilizados nas simulações foram a área máxima que pode ser cultivada por habitante anualmente e a taxa básica de crescimento anual da população.

De acordo com os dados de entrada que se encontram no modelo, a área total é de 25 Km<sup>2</sup> (ou 2500 ha); a necessidade de alimentos para manter a taxa básica de crescimento da população é de 200 kg/pessoa/ano e o rendimento máximo da cultura, obtido com um pousio de 40 anos, é de 2000 kg/ha/ano.

Considerando a área máxima cultivada de 0,1 ha/pessoa/ano, a população que a densidade demográfica que este sistema pode manter é aproximadamente 25 pessoas/km<sup>2</sup> (625 pessoas em 25 km<sup>2</sup>), sem que o seu crescimento demográfico seja alterado, isto é, com as pessoas satisfazendo plenamente as suas necessidades alimentares evitando assim o aumento da mortalidade devido à problemas nutricionais.

Até aqui consideramos o sistema de uma forma estática. Para analisar a sua dinâmica foi considerada uma taxa inicial de crescimento demográfico de 0,5% ao ano. A partir de uma simulação observamos que a população suportada pelo sistema agora cresce até aproximadamente 752 pessoas, estabilizando-se a partir deste ponto. Isto pode ser explicado pelo fato de, ao chegar ao limite de 625 pessoas a população ainda está crescendo e continua a fazê-lo até que o aumento da mortalidade a estabilize. Este aumento da mortalidade, por sua vez, é provocado pela queda da disponibilidade de alimentos por pessoa devida à diminuição dos rendimentos decorrentes da diminuição do pousio. É interessante observar que a alteração da taxa inicial de crescimento da população não altera o seu comportamento, embora taxas

---

<sup>5</sup> Ou outras formas de diminuição da população como emigrações.

mais altas façam com que o sistema se estabilize com populações maiores, as quais são atingidas mais rapidamente. Pequenas alterações da área máxima cultivada por pessoa em relação a 0,1 ha/ano provocam efeitos na mesma escala. Enfim, quando a área máxima que pode ser cultivada por pessoa é próxima de 0,1 ha/ano, populações iniciais diferentes não provocam nenhuma alteração qualitativa no comportamento do sistema, inclusive no que diz respeito a população de equilíbrio atingida.

Porém, as simulações considerando uma área máxima que pode ser cultivada por pessoa significativamente maior indicaram que o comportamento do sistema muda radicalmente. Neste caso, quando a população máxima que pode ser sustentada com a plena satisfação das necessidades nutricionais é ultrapassada, o modelo simula que os agricultores aumentam a área cultivada para tentar compensar a diminuição da disponibilidade de alimentos. O resultado disto é que o sistema entra em um regime de funcionamento quase-periódico apresentando ciclos que são aproximadamente da mesma duração. Isto pode ser explicado pelo fato do aumento da área cultivada por pessoa provocar uma drástica diminuição dos períodos de pousio, levando a uma queda acentuada dos rendimentos o que, após certo tempo, não pode mais ser compensado pelo aumento da área cultivada, provocando uma diminuição repentina da disponibilidade de alimentos. Conseqüentemente, a mortalidade aumenta drasticamente levando, desta vez, a uma diminuição da população. Após um rápido período de acentuada queda da população, esta passa a se recuperar, reiniciando o ciclo.

A figura 3 mostra os resultados de simulações onde foram consideradas áreas máximas que podem ser cultivadas de 0,1 e 0,4 ha/pessoa/ano. A diferença do comportamento do sistema entre os dois casos é bastante clara. Assim, no primeiro caso (0,1 ha/pessoa/ano de área cultivada máxima), como já comentado acima, a população se estabiliza em cerca de 752 habitantes. Já quando a área máxima cultivada foi de 0,4 ha/pessoa/ano, a população oscila violentamente, atingindo picos de cerca de 770 pessoas para, após, cair para cerca de 410 pessoas, em menos de 7 anos.

Para observar a sensibilidade do sistema as condições iniciais quando em regime quase-periódico procurou-se exacerbar a amplitude dos ciclos fixando-se a área máxima cultivada em 1,0 ha/pessoa/ano. Foram então realizadas duas simulações com uma variação de apenas uma pessoa na população inicial. Os resultados destas simulações podem ser observados na figura 4 onde o aumento da divergência das trajetórias do sistema é evidente, com a diferença atingindo aproximadamente 195 pessoas, no ano 1964 (quando ambas as trajetórias estão na mesma fase do ciclo).

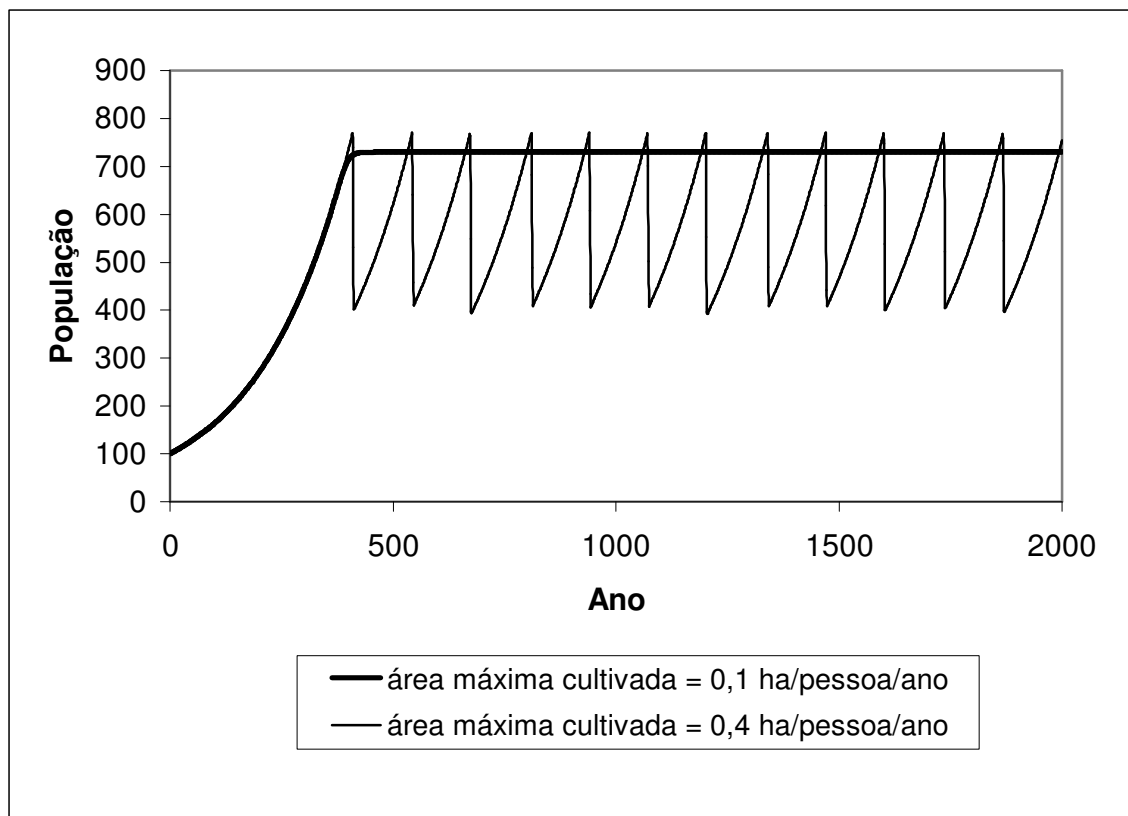


Figura 3. Dinâmica populacional de um sistema agrário de derrubada e queimada, com diferentes áreas máximas que podem ser cultivadas por pessoa anualmente.

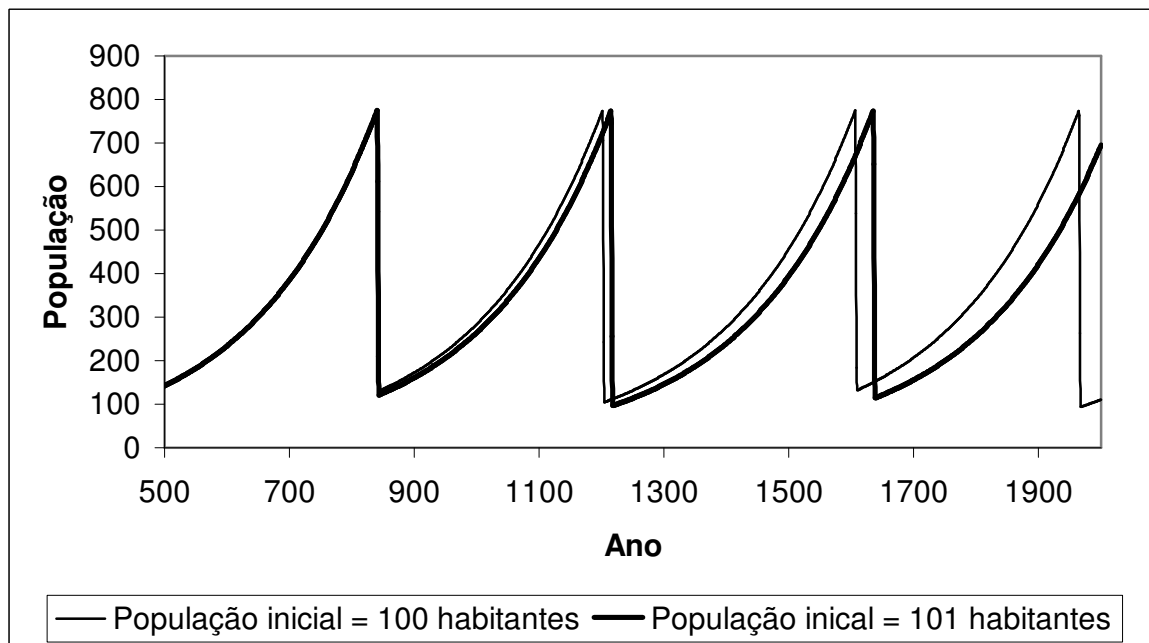


Figura 4. Dinâmica populacional de um sistema agrário de derrubada e queimada, sob diferentes condições iniciais.

Conforme discutido acima, as perturbações desempenham um papel importante no comportamento dos sistemas complexos presentes na biosfera, especialmente no que se refere a presença de ordem por flutuação e criticalidade auto-organizada.

Uma das características típicas das atividades agrícolas é a sua dependência das condições climáticas, as quais originam assim perturbações aleatórias do estado dos sistemas agrários. Para observar o efeito destas perturbações sobre a dinâmica do sistema de derrubada e queimada, efetuamos simulações considerando variações aleatórias, distribuídas uniformemente, de até 10% do rendimento da cultura. Os resultados obtidos com áreas máximas de 0,1 e 0,4 ha/pessoa/ano são mostrados na figura 5.

Na figura 5 pode-se observar que sob variações aleatórias a população máxima é atingida mais tarde quando a área máxima cultivada é de 0,1 ha/pessoa/ano. Isto ocorre porque neste caso, ao contrário de quando a área máxima cultivada é de 0,4 ha/pessoa/ano, as variações negativas dos rendimentos não podem ser compensadas por um aumento da área cultivada nos anos posteriores, provocando assim uma diminuição da disponibilidade de alimentos por pessoa e, conseqüentemente, um aumento da mortalidade. Como esperado, a população de equilíbrio atingida quando a área máxima cultivada é de 0,1 ha/pessoa/ano apresenta oscilações devido às variações aleatórias do rendimento da cultura. Já no caso em que a área máxima cultivada é de 0,4 ha/pessoa/ano, o sistema apresenta apenas oscilações de grande magnitude, semelhantes às mostradas na figura 2, quando a mesma área máxima cultivada foi considerada. No entanto, tais oscilações não são idênticas. O caráter aperiódico das oscilações populacionais apresentadas pelo sistema quando a área máxima cultivada foi de 0,4 ha/pessoa/ano mostrado na figura 5 é muito mais pronunciado do que o mostrado na figura 3. Além disso, a figura 5 mostra que os ciclos apresentados quando a área máxima cultivada é 0,4 ha/pessoa/ano são distintos quando a simulação é repetida, mesmo considerando-se os mesmos valores iniciais, como foi o caso.

Sintetizando, os resultados obtidos nas simulações indicam que a mudança de um parâmetro - a área máxima que uma pessoa pode cultivar - provocou uma bifurcação, com a passagem de um regime de funcionamento regular para um regime de funcionamento aperiódico, com o sistema passando a apresentar criticalidade auto-organizada, sendo que os valores da variável de estado observada (população) oscilam amplamente. Tais oscilações tornam o comportamento do sistema de difícil previsão. É importante salientar que esta

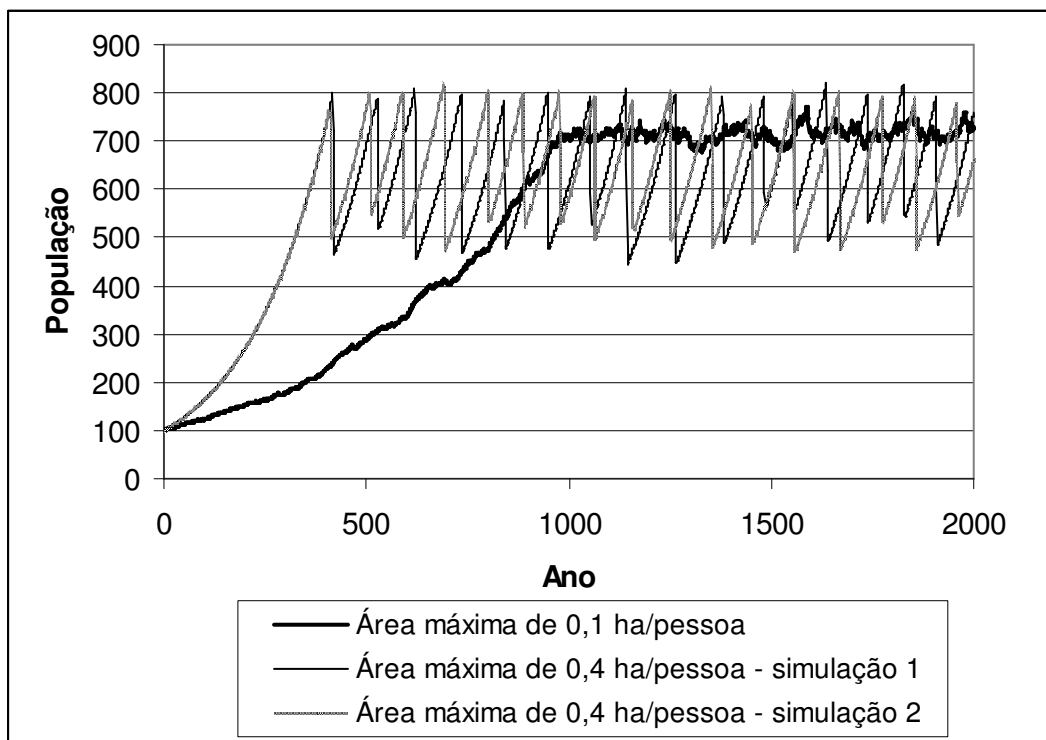


Figura 5. Dinâmica populacional de um sistema agrário de derrubada e queimada, com diferentes áreas máximas que podem ser cultivadas por pessoa anualmente, considerando variações aleatórias do rendimento da cultura.

imprevisibilidade não é um atributo específico dos componentes do sistema, mas é um produto das relações que estes componentes mantêm entre si. Aliás, quando considerado isoladamente, o comportamento dos componentes do modelo (inclusive o dos agricultores) é bastante previsível. Em suma, as simulações efetuadas com o modelo indicam que um sistema agrário de derrubada e queimada pode apresentar uma dinâmica característica de um sistema complexo.

### A evolução dos sistemas de derrubada e queimada

Os sistemas agrários de derrubada em queimada foram os precursores de um grande número de sistemas agrários. No entanto, dentre esses sistemas, dois grandes tipos se destacam pela sua abrangência histórica e geográfica, os sistemas com alqueive e pecuária e os sistemas hidráulicos (Mazoyer & Roudart, 1998). Neste artigo discutimos a transformação dos sistemas de derrubada e queimada em sistemas com alqueive e pecuária, tal como estas ocorreram na Europa Ocidental (Mazoyer & Roudart, 1998), com o intuito de aprofundar a interpretação dos resultados obtidos nas simulações.

Os sistemas com alqueive e pecuária se desenvolveram pela possibilidade de utilizar o gado, bovino principalmente, como um meio de transferência de nutrientes de pastagens e florestas para as terras de cultura, permitindo o abandono da prática do pousio. No lugar deste as terras eram constantemente lavradas durante o dia, servindo de locais de repouso para o gado durante a noite (a "parcagem noturna"), o que garantia o acúmulo das suas dejeções. Durante o dia o gado era utilizado como meio de tração e se alimentava nas pastagens comunais e nas florestas. A constituição desses sistemas pressupunha, portanto, a criação de grandes herbívoros e a metalurgia, esta última para a fabricação de arados e outros implementos necessários para a manutenção das culturas livres de invasoras. Estas duas condições, por sua vez, correspondem a uma significativa acumulação de meios de produção, o que, como visto acima, não se constitui em uma característica dos sistemas agrários de derrubada e queimada. Além disso a implantação de um sistema agrário com alqueive e pecuária pressupunha a instituição de novas regras de acesso a terra, a qual deixa de ser livre para as terras de cultura, como no sistema anterior (Mazoyer & Roudart, 1998).

Interpretando estas mudanças sob a ótica da dinâmica do sistema agrário de derrubada e queimada pode-se argumentar que a tração animal, ao permitir aumentar a área que uma pessoa poderia cultivar, se aplicada isoladamente agravaria a dinâmica de crise de um sistema agrário ainda baseado na derrubada e queimada. Além disto, o desenvolvimento de novas regras de acesso a terra, fundamental para a organização da parcagem noturna e do controle sistemático das plantas invasoras, não teria sentido algum de ser aplicado isoladamente. Isto faz com que a instituição do novo sistema agrário dificilmente pode ter sido resultado da aplicação de inovações técnicas sem o surgimento de relações sociais que assegurassem a sua eficiência, levando o sistema a uma mudança qualitativa.

É interessante especular um pouco sobre os resultados obtidos nas simulações à luz destes dados históricos. No modelo de sistema agrário de derrubada e queimada construído para a realização das simulações foram consideradas apenas variações aleatórias dos rendimentos das culturas. As simulações indicaram que tais variações podem originar uma trajetória de aumento da população, ou seja, uma recuperação do sistema após uma crise. Isto também seria válido para perturbações não aleatórias. Assim, novas técnicas elaboradas pelos agricultores poderiam melhorar a performance do sistema provocando o crescimento da população. E as simulações mostram que o efeito destas técnicas seria tanto mais dramático quanto mais instável for o regime de funcionamento do sistema. Por outro lado, a história dos sistemas agrários da Europa Ocidental nos indica que a evolução do sistema de derrubada e

queimada ocorreu por meio de inovações contrárias à lógica da sustentabilidade deste sistema enquanto tal. As simulações mostram claramente que o aumento da área cultivável por pessoa pode levar um sistema agrário de derrubada e queimada a uma dinâmica de crise, mas a história nos mostra que, quando um aumento deste tipo foi acompanhado por novas formas de reprodução da fertilidade, cuja viabilidade dependeu da instituição de novas regras de acesso a terra<sup>6</sup>, ele se constituiu em fator de evolução do sistema.

Também é interessante salientar que, ao observarmos um sistema agrário, há uma forte tendência de pensarmos em soluções aos seus problemas por meio de medidas contrárias à atuação dos fatores que o levam a uma dinâmica de crise. Em outras palavras, quando procuramos soluções aos problemas de um sistema agrário, tendemos, individualmente, a analisá-lo segundo a sua própria lógica<sup>7</sup>. Mas os processos coletivos de construção de soluções alternativas não sofrem estas restrições, na medida em que não estão ligados às limitações próprias às percepções individuais dos problemas. Porém, tais soluções não são automáticas e nem, necessariamente, imediatistas, na medida em que a sua constituição ocorre por meio de processos de aprendizagem coletiva, os quais podem tornar os processos decisórios mais eficientes em termos evolutivos, inclusive no que diz respeito ao desenvolvimento e sustentabilidade da sociedade.

### **Sistemas agrários, sistemas complexos**

A análise dos mecanismos fundamentais responsáveis pela complexidade da dinâmica do sistema agrário de derrubada e queimada, formalizados no modelo de simulação, permite que especulemos sobre as possibilidades de generalizar tal dinâmica a outros sistemas agrários, característicos de contextos históricos e geográficos distintos.

Assim, nos parece que duas características do sistema agrário modelado foram essenciais para que o mesmo apresentasse um comportamento característico de um sistema complexo, com bifurcações, criticalidade auto-organizada e propriedades emergentes. A primeira delas é a existência de uma capacidade de suporte que, ao ser ultrapassada, leve o sistema a um estado crítico. A segunda condição é que, atingido este estado crítico, o sistema adote uma dinâmica que o leve a aumentar a sua capacidade de suporte no curto prazo, mas que tenha como consequência, a partir de um determinado momento, a ocorrência de uma diminuição brusca desta mesma capacidade (retro-alimentação positiva).

---

<sup>6</sup> Que por sua vez surgiram a partir de novas relações sociais.

<sup>7</sup> Ou seja, em termos da teoria dos sistemas complexos, no âmbito da zona de influência do atrator do sistema.



Até que ponto estas duas condições para a ocorrência de mudanças de regime de funcionamento podem ser observadas na dinâmica dos sistemas agrários ao longo da história da Humanidade?

A resposta a esta questão só pode ser obtida por meio da análise de tais sistemas, na qual a elaboração de modelos de simulação que permitissem especificar formalmente a dinâmica dos sistemas pode desempenhar um importante papel. Evidentemente isto representa todo um programa de pesquisa que ultrapassa em muito os objetivos deste trabalho.

No entanto, alguns elementos de resposta são possíveis de serem discutidos a partir de informações existentes na literatura. Assim, Mazoyer & Roudart (1998) indicam a existência de crises recorrentes em vários sistemas agrários devido justamente as duas condições descritas acima. Por exemplo, os autores indicam ciclos recorrentes de crise e recuperação do sistema europeu de alqueive e pecuária que se estenderam desde o século XIV até o advento da propriedade privada. Além disso, os autores indicam a existência de crises localizadas do próprio sistema agrário baseado em equipamentos e insumos industriais, dominante atualmente, que são positivamente retro-alimentadas. Enfim, é possível que muitas das preocupações relativas a sustentabilidade da agricultura contemporânea, como os movimentos em prol da agricultura orgânica, podem se constituir em reações da sociedade a alguns dos efeitos ambientais desta crise.

Porém, é provável que as duas condições discutidas acima não se constituam nas únicas fontes de complexidade, presentes nos sistemas agrários contemporâneos. Por exemplo, a estrutura concorrencial (que torna os agricultores tomadores de preços) e o comportamento discreto, associados à baixa elasticidade da demanda, tornam plausível a possibilidade do mercado de produtos agropecuários apresentar regimes de funcionamento caótico-deterministas (Boussard, 1996; Chiarella, 1988; Silva Neto, 2004). Na medida em que a dinâmica do mercado dos produtos agropecuários é um elemento central da dinâmica dos sistemas agrários contemporâneos, a presença de regimes de comportamento caótico-deterministas nestes mercados corrobora fortemente a hipótese de comportamento complexo destes sistemas.

Enfim outro indicativo de comportamento complexo dos sistemas agrários é fornecido pela observação do papel que as inovações técnicas exerceram sobre as suas mudanças ao longo da história. É muito comum que mudanças significativas nos sistemas agrários ocorram apenas muito tempo após o aparecimento das inovações técnicas às quais tais mudanças em geral são associadas. Tal fenômeno é observado desde a origem da agricultura. Assim,

Mazoyer & Roudart (1998) sublinham que as inovações técnicas que permitiram o surgimento da agricultura (ferramentas de pedra lascada e polida) já eram correntemente utilizadas milênios antes que a humanidade as empregasse especificamente para trabalhos agrícolas. O mesmo pode-se dizer dos sistemas de cultivo trienais baseados no uso do arado com rodas (aliados a charretes, estábulos e outras inovações relacionadas à pecuária) responsáveis pela Revolução Agrícola da Idade Média, os quais já eram praticados centenas de anos antes por povos celtas e germanos (Mazoyer & Roudart, 1998). Um último exemplo, também citado por estes autores, é a existência dos sistemas de rotação de culturas alimentares com forrageiras que desempenharam um papel central durante a Primeira Revolução Agrícola dos Tempos Modernos, ocorrida a partir do século XVII, mas que já eram conhecidos muito tempo antes.

Estas observações evidenciam a dificuldade de realizar uma relação direta entre o comportamento de um sistema agrário e mudanças isoladas em alguns dos seus elementos. Os casos citados acima mostram que muitas técnicas agrícolas tiveram pouco efeito sobre o sistema como um todo quando não se encontravam em um contexto social adequado. Porém, a história dos sistemas agrários mostra que, no momento em que tais condições ocorrem, os efeitos não lineares (retro-alimentações positivas) das inovações técnicas podem provocar grandes mudanças no sistema.

### **Conclusões**

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que os conceitos relacionados à complexidade podem trazer contribuições significativas para a interpretação da dinâmica dos sistemas agrários. A possibilidade dos sistemas agrários de derrubada e queimada, sob certas condições, apresentar criticalidade auto-organizada foi claramente evidenciada. Além disto, os conceitos relacionados à complexidade mostraram-se bastante promissores para a interpretação da dinâmica de outros sistemas agrários. Neste sentido, o trabalho evidencia a possibilidade dos conceitos relacionados à complexidade virem a se constituir em um quadro teórico interessante para a compreensão do comportamento dos processos de evolução histórica e de diferenciação geográfica da agricultura.

### **Referências bibliográficas**

BERTALANFY, L. VON, General System Theory. New York, George Braziller, 1968.

BOSERUP, E. Evolução da agricultura e pressão demográfica. São Paulo: Ed. Hucitec, 1987.

BOUSSARD, J.-M., "When Risk Generates Chaos". Journal of Economic Behaviour and Organization, 29:433-446, 1996.

BROWN, T.; A. Measuring chaos using the Lyapunov Exponent. In KIEL, D. L. & ELLIOT, E. (ed.); Chaos theory in the social sciences: foundations and applications. Michigan, University of Michigan Press, p. 53-66, 1997.

CHIARELLA, C. The Cobweb Model: Its Instability and the Onset of Chaos. Economic Modelling, 5:377-384, 1988.

DUFUMIER, M. Agricultures et paysanneries des Tiers Mondes. Paris, Editions Karthala, 2004.

GRIBBIN, J. Deep simplicity: bringing order to chaos and complexity. New York, Random House, 2004..

GUNDERSON, L. H. & HOLLING, C. S. (editors), Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Island Press, London, 2002.

HANNON, B. e RUTH, M. Modeling dynamic economic systems. New York: Springer-Verlag, 1997.

HOLLING, C. S.; GUNDERSON, L. H. & PETERSEN, G. D.; Sustainability and Panarchies. In GUNDERSON, L. H. & HOLLING, C. S. (editors), Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Island Press, London, 2002, p. 63-102.

KAUFFMAN, S. A. At home in the Universe: the search for the laws of self-prganization and complexity. Oxford: Oxford University Press, 1995.

MAZOYER, M. & ROUDART, L. Histoire des agricultures du monde: du néolithique à la à la crise contemporaine. Paris: Seuil, 1998.

PER BAK e CHEN, K. Self-Organized Criticality, *Scientific American*, Janeiro: 46-53, 1991.

PRIGOGINE, I. & STENGERS, I., La nouvelle alliance. Métamorphose de la science. Paris: Ed. Gallimard, 1986.

PRIGOGINE, I. & STENGERS, I., Entre le temps et l'éternité. Paris, Flammarion, 1992.

PRIGOGINE, I. Les lois du chaos. Paris, Flammarion, 1994.

PRIGOGINE, I., The End of Certainty: time, chaos, and the new laws of nature. New York, The Free Press, 1997.

PRIGOGINE, I.; Criatividade da natureza, criatividade humana. In Carvalho, E. de A. & Mendonça, T. Ensaio de complexidade 2. Porto Alegre, Sulina, 2004.

SILVA NETO, B. Complexidade e Desenvolvimento. Desenvolvimento em Questão No. 4, p. 9-32, 2004.

SILVA NETO, B.; Abordagem sistêmica, complexidade e sistemas agrários. In: MOTA, D. M. da; SCHMITZ, H. & VASCONCELOS, H. E. M. (Org.). Agricultura familiar e abordagem sistêmica. 1 ed. Aracaju: Sociedade Brasileira de Sistemas de Produção, v. 1, p. 81-103, 2005a.

SILVA NETO, B. (Org.); BASSO, David (Org.); Sistemas Agrários do Rio Grande do Sul. Análise e Recomendações de Políticas. Ijuí: Editora UNIJUI, 2005b.

STELLA and STELLA Research: An Introduction to Systems Thinking, Hanover, High Performance Systems, Inc., 1997.