

# ENSINANDO SOBRE A SENSIBILIDADE ÀS CONDIÇÕES INICIAIS DE UM SISTEMA COMPLEXO\*

## TEACHING ABOUT COMPLEX SYSTEM SENSITIVITY TO INITIAL CONDITIONS

Alexandre Alex Barbosa Xavier<sup>1</sup>  
Antonio Tarciso Borges<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, lex.lutor@globo.com  
<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, tarciso@coltec.ufmg.br

### Resumo

Nas últimas quatro décadas, diversos cientistas da computação desenvolveram uma variedade de ferramentas computacionais para o estudo de sistemas não-lineares que hoje podem ser implementadas em microcomputadores domésticos e utilizadas para o estudo de sistemas complexos. Um exemplo dessas ferramentas é o Autômato Celular (AC). Um dos mais conhecidos modelos de AC é o “Jogo da Vida” inventado pelo matemático John Conway na década de 60. Neste trabalho, um grupo de estudantes do ensino fundamental, utiliza esse autômato para explorar padrões emergentes. O trabalho consistiu numa análise do pensamento expressado pelos estudantes sobre a sensibilidade do comportamento dos padrões que surgiam no AC devido às alterações nas condições iniciais e a avaliação do Jogo da Vida como recurso pedagógico para a introdução de discussão sobre comportamentos complexos na escola fundamental.

**Palavras-chave:** sistemas complexos, ensino de ciências, autômato celular

### Abstract

Through the last four decades scientists have developed a number of computational tools for the study of non-linear systems. These tools can be implemented in current microcomputers and can be used for the study of complex systems. Cell Automaton is one of these tools, and among them the Life Game, created by mathematician John Conway in the 1960's. In this work a group of secondary school students use this software to explore the behavior of evolving patterns. It presents an analysis of students' thinking about the system's sensitivity to changes in the initial conditions, and discuss the potential of CA as tools for introducing complex systems in secondary science education.

**Keywords:** complex systems, science education, cell automata.

---

\* Apoio: CNPq

## INTRODUÇÃO

O mundo exibe uma rica diversidade de sistemas e fenômenos complexos, abrangendo desde nossos próprios corpos até os ecossistemas e sistemas econômicos. A educação em ciências e matemática, até mesmo na universidade, conferem pouca atenção aos sistemas complexos, preferindo enfatizar o estudo de sistemas lineares, aproximações e idealizações. Estes artifícios permitem tratar os sistemas e os padrões e arranjos que eles produzem. Há dois problemas principais com esta preferência. O primeiro é que os sistemas reais encontrados a todo o momento são principalmente não-lineares, não os sistemas lineares estudados. Em segundo lugar, ela não contribui para o desenvolvimento e entendimento de formas explicativas mais sofisticadas e acaba reforçando modos de raciocínio de senso comum, como a causalidade linear e causalidade seqüencial. A questão central que motivou este trabalho é: Como podemos incentivar a compreensão de sistemas não-lineares e o familiarizar os estudantes com outras formas de causalidade, numa cultura escolar tão amplamente confinada à linearidade?

Nos últimos tempos uma “teoria do caos” vem sendo explorada por matemáticos, físicos, biólogos, entre outros, para resolver problemas difíceis de serem resolvidos de outras formas. O termo teoria do caos parece contradizer a razão, mas é usado para designar o estudo qualitativo do comportamento instável e não periódico de sistemas dinâmicos deterministas não-lineares. Restringimos nossa discussão ao caos macroscópico, distinguindo-o do caos quântico, que tem papel importante na teoria das estruturas dissipativas de Prigogine. A literatura existente de divulgação científica e de educação em ciências trata de sistemas complexos e da complexidade priorizando a discussão de temas complicados como reversibilidade e irreversibilidade, determinismo e indeterminismo, com poucas recomendações viáveis para mudar a prática docente.

Uma característica distintiva de sistemas não-lineares é a sua susceptibilidade a pequenas modificações nas suas condições iniciais. O universo é caótico e cheio de incertezas. Apesar de surpreendente sucesso da ciência em suas previsões acerca do comportamento de sistemas naturais e construídos, isso não é a regra. Pode ser muito difícil prever com confiança o que deverá ocorrer em situações futuras para muitos sistemas importantes. Os cientistas e matemáticos desenvolveram formas de lidar com tais sistemas que mostram comportamento caótico e não-linear. De maneira simples, um sistema complexo é um sistema que se mostra sensível às condições iniciais. Qualquer incerteza nas condições iniciais não importa qual pequena seja ela, levará a erros crescentes nas tentativas de previsão do comportamento futuro daquele sistema. Além disso, é difícil de se atribuir causalidade à maioria desses sistemas.

Em suas tentativas de modelamento computacional de fenômenos meteorológicos, Lorenz descobriu as bases da corrente principal do estudo de caos. Sistemas descritos por meio de poucas equações com poucas variáveis de estado poderiam exibir comportamentos altamente complexos que não podiam ser previstos e antecipados. Lorenz mostrou que pequenas diferenças em uma variável tinham efeitos profundos sobre a aparência futura do sistema. Na linguagem do caos, isto é chamado de efeito borboleta, ou a extrema sensibilidade do sistema em relação às suas condições iniciais. As condições iniciais são entendidas como as condições no início de qualquer intervalo de tempo de interesse para o pesquisador.

Os sistemas caóticos são instáveis uma vez que tendem a não resistir às perturbações externas e às mudanças, mesmo pequenas, nas condições iniciais. As variáveis que descrevem o estado de um sistema caótico não apresentam repetições regulares de valores, o que as tornam

aperiódicas. Os sistemas que exibem comportamento complexo são sistemas formados por unidades interconectadas que influenciam umas às outras. Um dos aspectos intrigantes dos sistemas complexos é que eles podem apresentar comportamentos coerentes, envolvendo todo o organismo, revelando extraordinária organização, realizando atividades altamente cooperativas, ou até mesmo passar por transições que os conduzam a um comportamento inteiramente caótico. A pesquisa em sistemas complexos, além de contribuir para uma nova forma de descrever, observar e significar os fenômenos no mundo, aborda também algumas questões de profunda importância na ciência e na filosofia como: ordem e caos, aleatoriedade e determinismo, análise e síntese (Gleick, 1990; Prigogine, 1996; Johnson, 2002).

No ensino de ciências, o desenvolvimento de atividades para explorar o comportamento desses sistemas, tende, provavelmente, a ajudar na compreensão dos mesmos. O entendimento de como um fenômeno complexo emerge de interações simples, e como padrões surgem a partir de eventos aleatórios, remete ao reconhecimento de que a existência de uma causa central é desnecessária, à importância dos diferentes níveis de descrição possíveis, e à compreensão de que pequenas mudanças nas interações entre as partes podem trazer significativas mudanças no comportamento global do sistema.

Apesar da diversidade, os sistemas complexos têm muitas características estruturais e funcionais em comum que podem ser efetivamente simuladas usando ambientes computacionais, propiciando um rico engajamento com esses sistemas descentralizados. Como resultado, qualquer um pode explorar, virtualmente, a natureza dos sistemas complexos e seu comportamento dinâmico sob uma gama de suposições e condições. O desenvolvimento da habilidade de modelar sistemas dinâmicos tem poderosa influência sobre o ensino e o estudo da complexidade (Jacobson, 2000).

Neste artigo, que expõe parte de um trabalho mais amplo (Xavier, 2003), utilizamos uma ferramenta baseada na teoria dos autômatos celulares - o Jogo da Vida - para abordar sistemas complexos com um grupo de estudantes do ensino fundamental (8<sup>a</sup>. série) e, assim, mostrar as potencialidades dessa ferramenta como recurso auxiliar para a abordagem de sistemas complexos com estudantes do ensino fundamental e médio. Apresentamos uma análise do processo de entendimento dos estudantes da utilização do Jogo da Vida e como esses estudantes entenderam a influência das condições iniciais na evolução temporal dos sistemas e na emergência de padrões globais aparecem no autômato ao longo do tempo.

O ensino dos sistemas complexos evidencia-se, não só como um tópico no programa escolar, mas como um importante tema que manifesta uma nova forma de se discutir causalidade, relações macro-micro e previsibilidade, constituindo momentos relevantes para a construção de uma visão diferente da natureza da ciência e, mais adiante, do próprio mundo.

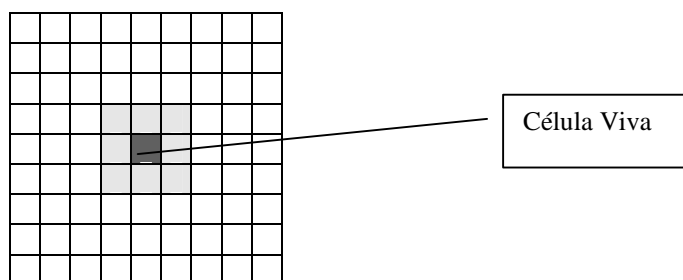
## **O QUE SÃO AUTÔMATOS CELULARES?**

Na segunda metade do século XX, paralelo ao reconhecimento dos fenômenos complexos que incluem os fenômenos de emergência e fenômenos caóticos, e ao aprofundamento em seu entendimento, aconteceu uma ampliação da utilização dos dispositivos eletrônicos, como os computadores, nos meios científicos. Essa ampliação propiciou o modelamento e simulação dos mais diversos fenômenos, em vários domínios distintos da ciência.

Nas últimas quatro décadas, diversos cientistas da computação desenvolveram uma variedade de ferramentas computacionais que podem ser utilizadas para o estudo de sistemas

complexos. Um exemplo dessas ferramentas é o Autômato Celular (Wolfram, 1986). Os AC foram originalmente concebidos por Stanislaw Ulam e John von Neumann ao final da década de 40 para proporcionar uma estrutura formal para a investigação do comportamento de sistemas biológicos. Um dos mais conhecidos modelos de AC é o “Jogo da Vida” inventado pelo matemático John H. Conway da Universidade de Princeton na década de 60. Apesar do nome é um sistema abstrato implementado em computador. Conway iniciou, em 1968, fazendo experimentos com uma variedade de diferentes regras para autômatos celulares bidimensionais que culminou na obtenção de um conjunto de regras simples que ele chamou “Jogo da Vida” e que exibiu uma série de comportamentos complexos.

O jogo acontece sobre uma grade infinita de células. Cada célula é inicialmente marcada como ocupada ou vazia (viva ou morta), criando algum tipo de configuração inicial arbitrária. A grade pode ter apenas uma dimensão sendo exibida como um arranjo retilíneo de células, ou duas ou três dimensões. O AC exibido na figura 1 é uma grade bidimensional onde cada célula pode ter dois estados, vivo/morto.



**Figura 1 - Célula Viva e sua vizinhança**

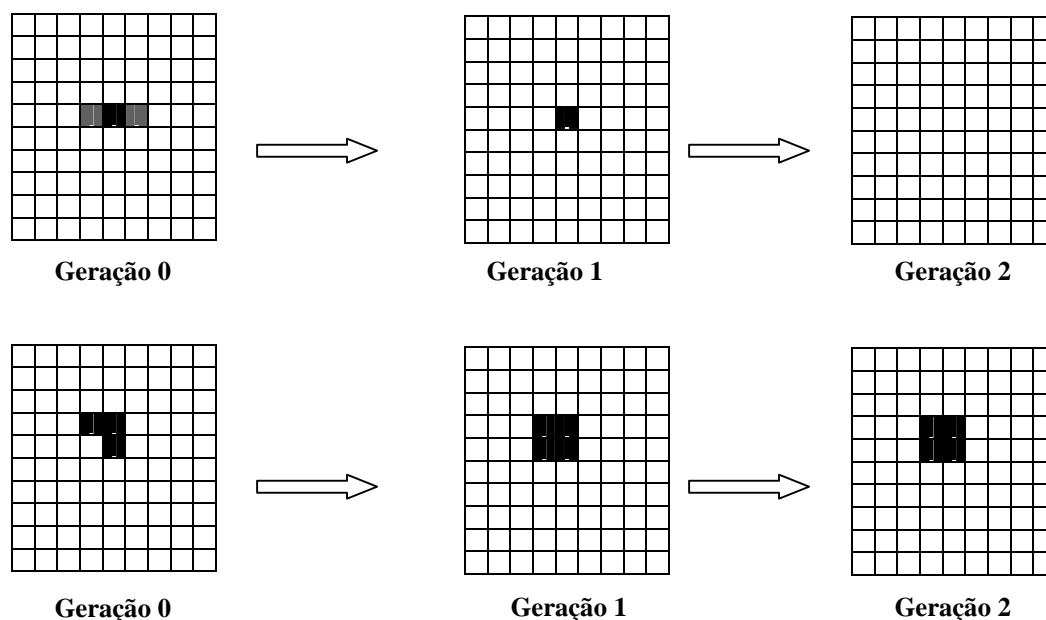
A não ser pelo estado vivo/morto (ligado/desligado), todas as células são idênticas e submetidas ao mesmo conjunto de regras que determinam sua evolução temporal, e de seus vizinhos, nas próximas gerações.. Embora vários tipos de regras sejam possíveis, aquelas definidas por Conway. são:

- *Uma célula viva com um ou nenhum vizinho vivo, morre por isolamento, na próxima geração.*
- *Uma célula viva com 4, ou mais vizinhos vivos, morre devido à superpopulação*
- *Uma célula morta com exatamente 3 vizinhos vivos torna-se viva, na geração seguinte.*
- *Todas as outras células permanecem inalteradas, na próxima geração.*

Essas regras são aplicadas para todas as células simultaneamente e cada vez que toda a matriz é recalculada, obtém-se uma nova geração. Cada geração é o padrão formado por todas as células da grade, como se fossem instantâneos congelados de todo o sistema, em sucessivos momentos de sua evolução. Como o programa roda através de múltiplas gerações, a matriz pode parecer se modificar apresentando as mais diversas configurações. Na verdade, essas regras simples engendram um mundo complexo surpreendente que mostra uma ampla gama de interessantes eventos e padrões.

A configuração exibida pela próxima geração depende da configuração da geração atual e das regras que determinam o estado futuro de cada célula. Dada uma certa configuração inicial e o conjunto de regras, qualquer pessoa pode determinar a configuração da geração seguinte e das outras

futuras gerações, de modo simples. Basta dispor de um retículo vazio, e ir aplicando as regras a cada célula da geração atual, determinando se aquela célula estará viva ou morta na próxima geração. O resultado é representado no retículo. Isso pode ser feito sucessivamente, sobre cada geração para determinar a próxima.



**Figura 2 - As gerações e as configurações**

Assim, um AC é um modelo que pode ser usado para mostrar como os elementos de um sistema interagem. É na verdade, um universo virtual em que as mudanças de estado são realizadas de acordo com um pequeno conjunto de regras. O “Jogo da Vida” tornou-se bastante conhecido em virtude de sua popularização através da revista *Scientific American* na sessão escrita por Martin Gardner, nos anos 70. Através de suas características e dos diversos trabalhos realizados a partir da década de 80, principalmente aqueles realizados por Stephen Wolfram, o autômato celular tem provado ser uma estrutura extraordinariamente rica para a exploração de fenômenos de auto-organização e caoticidade. (Wolfram, 1986; Wolfram, 2002, Green, 1990; Green, 1993; Green, 1994).

## **TRABALHOS REALIZADOS COM AMBIENTES BASEADOS EM AC**

Law, Lee & Tang (2000) utilizaram o ambiente de modelamento Worldmaker para desenvolverem uma série de atividades sobre comportamentos complexos de sistemas químicos, físicos e biológicos com estudantes das mais diversas idades (9 aos 18 anos). Segundo os autores, foram obtidos ótimos resultados tanto na aprendizagem da manipulação do ambiente computacional, quanto nos modelos construídos e implementados, mostrando um considerável entendimento dos sistemas em questão.

Penner (2000) utiliza os AC para trabalhar o entendimento de características de sistemas emergentes com um grupo de estudantes na faixa etária de 13 anos de idade. Seu objetivo era promover o entendimento da causalidade complexa, da análise em nível micro e macro do sistema e da dependência das condições iniciais na emergência de padrões globais. Lilly (1995) sugere

algumas aplicações dos AC (termodinâmica, hidrodinâmica, eletricidade, genética), integrando-os ao currículo escolar. Araújo (2000) utiliza o AUTCEL-RCO (Autômato Celular para o Raciocínio com Objetos), um ambiente de modelamento desenvolvido pela FURG, com crianças no estudo de um modelo biológico simples de contaminação de células sadias por vírus, em contato com células doentes e sua possível imunização através do contato com a vacina.

Os resultados desses trabalhos sugerem que a utilização dos AC no ensino de ciências tem um potencial considerável como instrumento para o desenvolvimento de um conhecimento mais profundo sobre os sistemas complexos. A utilização de ambientes de aprendizagem baseado nos AC possibilita a implementação de abordagens novas e de fácil assimilação pelos estudantes das mais diversas idades, justificando seu emprego nos mais diversos níveis de ensino. As pesquisas mencionadas mostram que, apesar das diferentes estratégias escolhidas para o processo de modelamento, os resultados são consideravelmente animadores, o que demonstra as potencialidades tanto dos caminhos escolhidos para a abordagem do assunto quanto dos estudantes (dos mais diversos níveis) em sua aprendizagem.

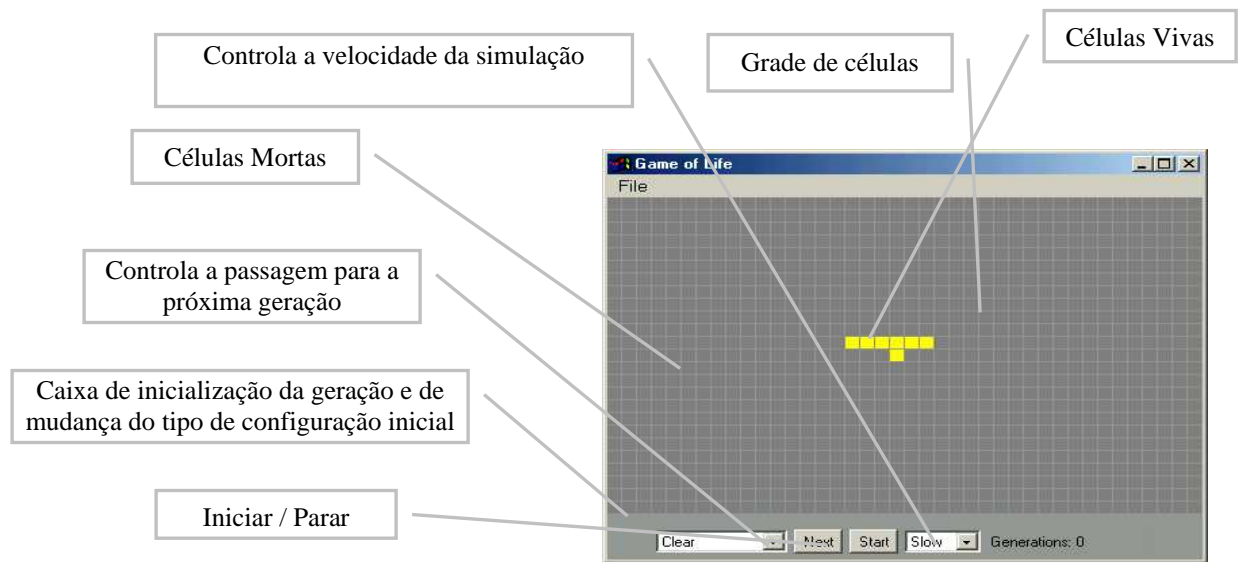
## **METODOLOGIA**

O acesso ao conhecimento e à maneira de pensar das pessoas tem uma grande importância na pesquisa em educação em ciências e no ensino. As práticas correntes para obtenção desse acesso são baseadas numa vasta variedade de técnicas. No estudo específico do ensino de sistemas complexos os trabalhos de pesquisa normalmente estão vinculados aos meios computacionais para a exploração do assunto, apesar de existirem trabalhos que não utilizem desse suporte. A utilização de computadores parece facilitar a representação desse tipo de sistema e, portanto, potencializa os processos de ensino e aprendizagem (Jacobson, 2000).

No trabalho realizado (Xavier, 2003) optamos por implementar um híbrido dessas estratégias e, assim, tanto trabalhar com um ambiente de simulação de sistemas complexos em computador, quanto com atividades de lápis e papel. Escolhemos como ferramenta de simulação o “Jogo da Vida”, o AC bidimensional já descrito, que por sua simplicidade pode ser implementado com lápis e papel quadriculado, além de poder ser utilizado em computadores, principalmente, quando se deseja padrões mais complexos (figura 3).

Deste trabalho participaram 6 estudantes (14-15 anos) que cursavam a 8ª. série do ensino fundamental. Estamos interessados em analisar o pensamento que os participantes expressavam sobre o comportamento dos padrões que apareciam no AC e a avaliação as potencialidades do Jogo da Vida como ferramenta pedagógica para a discussão de comportamentos complexos.

O trabalho com os estudantes se dividiu, basicamente, em duas etapas: a etapa exploratória e a etapa expressiva (Booham, 1997). Na etapa exploratória, os estudantes entraram em contato com as noções básicas sobre os autômatos celulares através de um conjunto de atividades realizadas com lápis e papel. Essa etapa tinha por objetivo permitir a familiarização dos participantes com a dinâmica do jogo, como as sucessivas gerações são produzidas a partir da aplicação do conjunto de regras, suas regras e aplicação, reconhecimento de alguns padrões típicos que surgem no curso de sua evolução e os efeitos da configuração inicial sobre o estado final do sistema. Essa etapa, propiciou também oportunidades para a observação do engajamento dos participantes na atividade e a sua relação com o AC, através de suas reações de curiosidade ou de enfado, as dúvidas mais frequentes e os erros mais comuns.



**Figura 3 - Interface do Jogo da Vida**

Na etapa expressiva foram realizadas atividades onde aconteciam discussões em grupo sobre a evolução de configurações implementadas, utilizando-se do computador. Essas discussões contemplavam a influência das condições iniciais na evolução das gerações, a previsibilidade do comportamento e a possibilidade de relacionar os autômatos celulares com alguns fenômenos reais conhecidos, isto é, sobre a possibilidade de usá-los como modelos de algum aspecto da realidade. Ainda nessa segunda etapa foram realizadas entrevistas como uma das estratégias para a explicitação do entendimento dos estudantes acerca do sistema. Os estudantes eram solicitados a prever, observar e explicar eventos e/ou situações relacionadas ao tema proposto, com o propósito de desencadear suas explicações sobre o comportamento e a causalidade dos sistemas complexos.

Neste trabalho, apresentamos a análise do processo de reconhecimento pelos estudantes, do papel das células a uma célula viva no AC (etapa exploratória) e como esses estudantes entenderam a influência da configuração inicial no desenvolvimento dos padrões (etapa expressiva).

## **INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES INICIAIS**

A relação entre as condições iniciais (geração 0) e os padrões emergentes é um elemento importante e caracterizador do comportamento do Jogo da Vida. Esse atributo do instrumento conduz à reflexão sobre a dinâmica das interações que acontecem entre as células e a possível previsibilidade das gerações futuras, o que leva, num sentido mais amplo, a uma reflexão sobre o comportamento de qualquer sistema complexo. Embora não entre nas regras de qualquer autômato celular, há uma ordenação temporal implícita atribuída a uma seqüência de gerações. Esta é a razão de se usar o termo geração ou de se falar em evolução dos padrões produzidos pela aplicação de uma determinada regra a um conjunto de células.

Nessa versão mais simples que utilizamos, cada célula só tem dois estados possíveis: vivo ou morto. No entanto, é possível pensar em variações onde um número maior de estados possa

caracterizar cada célula. Exemplos disso são os softwares WORDLMAKER e AUTCEL, que permitem simular um número maior de sistemas naturais, com maior grau de realismo, ao contrário dos AC simples que usamos. Mas estes são ainda suficientemente interessantes para simularem fenômenos como interação de sistemas de spins e de elétrons, difusão e simulação de fractais. Nessa seção, os trechos destacados espelham essa tentativa dos estudantes de entenderem como as configurações iniciais determinam os padrões das gerações subseqüentes e a partir desse entendimento realizarem previsões sobre os comportamentos e padrões que poderão acontecer.

Um outro aspecto é que as regras utilizadas referem-se aos estados da célula central e das 8 células imediatamente vizinhas, para se determinar o estado daquela célula central na geração seguinte. É como se considerássemos apenas interações de alcance muito curto. Obviamente que com outras regras, poderíamos levar em consideração as interações com outras camadas de vizinhos. Nada disso é, entretanto, essencial, se queremos utilizar os AC para a introdução de fenômenos complexos no ensino fundamental.

Num dos encontros, onde já havíamos trabalhado várias configurações, foi pedido aos estudantes que observassem as gerações sucessivas dessas configurações e determinassem se havia alguma relação entre o número de células vivas da geração inicial e o número de gerações:

*1 Joara: Acho que não.*

*2 Ian: Geralmente não!*

*3 Briza: É mesmo. Só em alguns!*

*4 Ian: Não é para todos que muda.*

*5 Briza: Em alguns acabou rápido.*

*6 Bruno: O número de células, na maioria das vezes, não alterou o número de gerações. Só em alguns.*

*7 Joara: Em geral não!*

*8 Briza: O que influencia é a posição das células.*

*9 Bruno: Até com 3 eu posso ter mais gerações do que a de 4.*

Os estudantes pareceram concordar que o número de células vivas, para os casos estudados, não influenciou muito o número de gerações (1-4). Segundo a fala dos estudantes não há uma relação direta entre o número de células vivas e o número de gerações subseqüentes (5,6). A estudante Briza aponta para a influência da posição das células (8) e Bruno ressalta que mesmo com um número menor de células vivas pode-se obter um número maior de gerações (9).

Através desse trecho, os estudantes demonstraram entender que a configuração das células na geração inicial é que determina o número de gerações. Eles pareceram entender, também, que o número de células vivas no padrão inicial não foi o fator preponderante para a determinação desse comportamento e sim seus posicionamentos dentro da matriz. Essa percepção tem uma importância significativa, pois desloca a observação da quantidade de células vivas para a disposição espacial delas, focalizando nessa abordagem as relações que se estabelecem entre as células e o futuro das gerações.

Nas entrevistas individuais, a relação entre as condições iniciais e o comportamento das gerações foi novamente abordada:

**10 Luiz:** *O número de células influencia. Influencia bastante! Huumm....(para e parece pensar por um instante) Talvez não. Depende muito. Talvez influencia mais a forma que você coloca. O número influencia, mas a ordem também. A ordem dos fatores altera o produto (ri).*

Nesse trecho, o estudante elabora sua resposta iniciando pela consideração que o número de células influi no comportamento das gerações, mas parece, depois, atribuir também importância ao posicionamento das células vivas.

**11 Marcus:** *Eu acho que o número de células influencia.*

**12 P:** *Como?*

**13 Marcus:** *Ah! Deixa eu ver... Depende do desenho, do grupamento. Um grupamento é que vai fazer ter continuidade ou não.*

**14 P:** *Uma forma inicial com 3 células vivas gera um número menor de gerações que uma forma com 5?*

**15 Marcus:** *Acho que não! Tem nada a ver não! Por exemplo...Por exemplo, acho que o de 3 pode ficar continuamente e um de 5, de 10 ou de 15 morrer rapidamente.*

**16 P:** *O comportamento depende do que então?*

**17 Marcus:** *Depende de como estão. Do tipo de grupamento.*

O estudante, assim como o Luiz, atribui inicialmente uma importância ao número de células da forma inicial (11). No entanto, ele passa a apontar o posicionamento das células, que ele chama de *desenho* ou *grupamento*, como fator preponderante no comportamento das gerações (13-17).

**18 Briza:** *Eu acho que o número não determina, mas pode determinar. Entendeu? Acho que depende mais da posição das células. Porque uma [configuração] de 4 pode durar mais que uma de 6 por exemplo.*

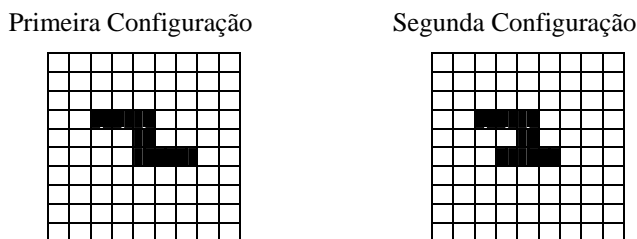
**19 Bruno:** *Depende do posicionamento. Não é só o número não. Mas tem que ser maior que tipo, 2 ou 3. Porque, assim, se for 2, morre. Se for 1, também, morre. Se for 3 depende do alinhamento e aí ele pode morrer ou viver.*

Esses trechos foram colhidos em momentos distintos, nas entrevistas individuais. No entanto, pode-se perceber que os estudantes (Briza e Bruno) seguem a mesma linha de pensamento dos estudantes anteriores, onde o posicionamento das células é mais importante para o comportamento das gerações do que o número de células vivas da geração inicial.

Eles se diferenciam dos outros estudantes porque aparentemente não atribuem, inicialmente, ao número de células um fator muito importante. No discurso desses últimos estudantes, a importância do número de células já aparece relativizada.

Ainda abordando a questão da influência das condições iniciais no comportamento das gerações, foi pedido aos estudantes, em suas entrevistas, que inventassem uma configuração inicial com 7 células vivas, que a implementassem utilizando o computador e observassem seu comportamento. Depois foi pedido que implementassem a mesma configuração anterior, mas com uma pequena modificação. O estudante deveria: alterar a posição de uma célula viva.

Por exemplo:



**Figura 4 – Tipo de alteração da configuração**

A alteração da posição de uma célula viva ocasiona uma mudança significativa no comportamento dos padrões subsequentes, o que causou espanto e surpresa na maioria dos estudantes entrevistados.

**20 Joara:** *Uau! Mudei uma célula! Uma continua e a outra morreu. A forma que elas tão ligadas é que dá o final. Uma morreu e a outra continuou. Mudar uma pode mudar muito. Depende do lugar.*

**21 Marcus:** *Eu mudei uma e ela morreu por asfixia e aí mudou o desenho. Outra nasceu no lugar dela. Se a gente muda uma coisinha, uma coisa mínima, tudo muda completamente.*

**22 Briza:** *Mudou hein?! As duas no final chegam a permanecer igual. Mas as formas ficam diferentes e o número de gerações muda. Acho que o reposicionamento de uma célula...Ai! Vai mudar a influência que ela vai ter sobre as outras células. Acho que o que determina não é o número, mas o posicionamento. Era praticamente o mesmo desenho. Com uma diferente e aí mudou tudo assim.*

Nesses trechos percebe-se a explicitação de surpresa (20, 22), mas que não deixou de transparecer no rosto de outros estudantes. Estas falas indicam novas percepções dos estudantes sobre o papel fundamental do posicionamento das células para o futuro das gerações e que alterações pequenas na configuração da geração inicial podem ocasionar grandes mudanças na evolução das gerações futuras e nas formas dos padrões que emergem. Como professores sentimos que é em momentos como estes é que se ganha a atenção e envolvimento dos estudantes, necessários para aprender para entender melhor.

De certa forma, essas percepções ratificam as conclusões já alcançadas ao longo da discussão sobre a influência das condições iniciais sobre o comportamento das gerações. Por outro lado, queremos argumentar que a experiência de descobrir isso é muito mais rica e produtiva para os estudantes do que ouvir falar ou ler que estes seriam os efeitos observados. No estudo de sistemas complexos, a percepção da sensibilidade do sistema às condições iniciais é de suma importância, pois é uma característica inerente a esses sistemas.

Através dessa atividade foi possível perceber que apesar de não ainda conseguirem estabelecer espontaneamente nenhum tipo de analogia com qualquer fenômeno real, os estudantes conseguiram estabelecer, ao menos dentro do jogo, uma forte relação entre as formas iniciais e o comportamento das gerações futuras.

Isso propicia uma compreensão mais profunda do comportamento do sistema, um início de compreensão de propriedades emergentes e o aumento da possibilidade de se estabelecer vínculos com outros sistemas e que estão presentes no ensino de ciências.

## CONCLUSÃO

A estratégia de promover a aprendizagem sobre a estrutura e a evolução dos autômatos celulares pareceu bem produtiva. Os estudantes aprenderam rapidamente e mostraram interesse e envolvimento. Ao longo da realização das tarefas com o grupo de estudantes, foi possível perceber, inicialmente, uma certa dificuldade no reconhecimento da vizinhança de uma determinada célula. Havia frequentemente um esquecimento das células vizinhas diagonais ou o esquecimento na observação da vizinhança das células mortas. Estas dificuldades eram esperadas, pois o processo envolve muitos passos. O que leva a erros, especialmente no início. Trata-se de aprender o que deve ser observado e levado em conta, isto é, o que é relevante para entender como o sistema funciona.

Para que se possa determinar a forma da próxima geração numa grade, o estudante deve começar com a primeira célula da geração atual, determinando seu estado. A seguir, ele determina o efeito combinado dos oito vizinhos imediatos da célula central e aplica a regra. Com isso ele determina o estado da célula central na geração seguinte e move-se para a célula imediatamente adjacente, repetindo todo o processo. Depois de várias iterações, que é o produto do número de linhas pelo número de colunas na grade, ele conclui a determinação da configuração da geração seguinte. Para cada nova geração ele repete todos estes procedimentos. O processo envolve muitos passos, e por isso, só é possível trabalhar manualmente com grades pequenas.

No entanto, apesar dos estudantes, inicialmente, apresentarem significativas diferenças em relação à familiarização com esses aspectos do Jogo da Vida, ao final da fase exploratória, todos apresentaram um nível muito bom de engajamento que se traduziu em boa utilização do instrumento, que pôde ser percebido pela queda acentuada no número de erros durante a realização dos trabalhos. Para o primeiro tema foram propostas discussões sobre a sensibilidade dos padrões a mudanças na configuração inicial e as dificuldades envolvidas no processo de previsão do comportamento das gerações.

Os estudantes apresentaram um bom entendimento dos fatores que influenciariam o comportamento das gerações futuras, apontando não só para o número de células vivas presentes no autômato, mas principalmente, para a disposição delas ao longo da grade. Além disso, os estudantes perceberam, até mesmo com certa surpresa, a modificação ocasionada por uma pequena alteração na configuração inicial. Eles assimilaram uma característica importante do Jogo da Vida que consiste na sensibilidade as condições iniciais. Um outro ponto importante que se evidencia é a possibilidade de um uso profícuo do Jogo da Vida na discussão de comportamentos complexos desde que haja uma familiarização prévia com a dinâmica do AC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, I. S. AutCel-RCO – Uma Alternativa para o Raciocínio com Objetos. **Rev. Eletrônica Mestr. Educ. Ambient.** Vol. Esp, Mai/Jun/Jul 2000, Disponível em <<http://www.sf.dfis.furg.br/mea/remea/>> Acesso em: 01 fev. 2002.

- BOOHAN, R. Computer Modelling and Dynamic Processes in Science Education. In: **Exploring Models and Modelling in Science and Technology Education**. Reading: University of Reading, 1997.
- GLEICK, J. **Caos : a criação de uma nova ciência** . Rio de Janeiro: Campus, 1990.
- GREEN, D. G. Emergent Behavior in Biological Systems. In Green, D. G.; Bossomaier, T. J. (eds.). **Complex Systems – From Biology to Computation**. Amsterdam: IOS Press, 1993.
- GREEN, D. G. Landscapes, cataclysm and Population Explosions. **Mathematical and Computer Modelling**, v.13, n.6, p.75-82, 1990.
- JACOBSON, M.J Problem Solving About Complex Systems: Differences Between Experts and Novices. In B. Fishman & S. O'Connor-Divelbiss (Eds.), **Fourth International Conference of the Learning Sciences**. Mahwah, NJ: Erlbaum, p. 14-21, 2000.
- JOHNSON, S. Emergência: a vida integrada de formigas, cérebros, cidades e softwares. Rio de Janeiro: Ed. Jorge Zahar, 2003.
- LAW, N.; LI, S.C.; LEE, R.; TANG, P. **WorldMaker: Making Collaborative Exploration of Complex Systems Accessible to Children**. Artigo apresentado no Global Chinese Conference on Computers in Education, Singapore. 2000.
- LILLY, H. A. **The Use of Cellular Automata in the Classroom**. 1995. Disponível em <[http://www.supercomp.org/sc95/proceedinigs/482\\_ALIL/SC95.htm](http://www.supercomp.org/sc95/proceedinigs/482_ALIL/SC95.htm)> Acesso em 24 jun. 2001.
- PENNER, D. E. Explaining Systems: Investigating Middle School Students' Understanding of Emergent Phenomena. **Journal of Research in Science Teaching**, v.37, n.8, p. 784-806, 2000.
- PRIGOGINE, I. A Nova Aliança: A Metamorfose da Ciência. Brasília: EdUnB, 1984.
- PRIGOGINE, I. O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza. São Paulo: UNESP, 1996.
- WOLFRAM, S. **Theory and Applications of Cellular Automata**. Singapura: World Scientific, 1986.
- WOLFRAM, S. **New Kind of Science**. Wolfram Media Inc, 2002.
- XAVIER, A. Explorando Sistemas Complexos no Ensino Fundamental. 2003. 162f.Dissertação (Mestrado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.