

Comparação entre o modelo baseado em equações e o modelo baseado em agentes: uma abordagem sobre a dinâmica presa-predador no NetLogo

Rafhael R. Cunha, Roger S. da Silva, Rodrigo M. Rabenhorst, Alex D. Camargo

Resumo—Modelos matemáticos podem ser ferramentas importantes para conceber as características inerentes a sistemas dinâmicos. Da mesma forma, atualmente, modelos baseados em agentes também são utilizados para tal finalidade. O objetivo do trabalho é elencar as vantagens e desvantagens na comparação entre os modelos implementados, baseados em agentes, e o modelo baseado em equações de Lotka-Volterra, já existente, sobre a dinâmica presa-predador. O trabalho relata um experimento de implementação do modelo de dinâmica populacional de Lotka-Volterra, no ambiente de programação NetLogo, utilizando modelos baseados em agentes. A realização deste trabalho oportunizou a simulação da dinâmica do modelo de equações utilizando agentes, porém com algumas limitações.

Palavras-chave—Modelos baseados em agentes, modelos baseados em equações, sistemas biológicos, dinâmica populacional, presa-predador, NetLogo.

I. INTRODUÇÃO

Populações de indivíduos que dividem o mesmo espaço e interagem entre si são observados na natureza e estudados pela biologia. Uma interação característica na dinâmica de populações entre dois seres de espécies diferentes é a relação presa-predador [1]. O primeiro modelo de presa-predador foi desenvolvido por Lotka-Volterra. Os autores do modelo tinham a intenção de estudar o aumento na presença de “selachians” (tubarões, arraias, etc) em portos italianos durante a primeira guerra mundial, quando a pesca teve uma grande diminuição [1].

Dentro do contexto deste trabalho, a modelagem e a simulação são métodos de análises complementares à dedução e à indução e são, principalmente, aplicados quando experimentos com o sistema real são caros ou impraticáveis [2]. A modelagem consiste em mapear um problema do mundo real em um modelo abstrato que o caracterize. Uma vez que o modelo de um sistema é construído, é possível a sua análise afim de se obter conclusões para posteriormente aplicá-las ao mundo real [3].

Rafhael R. Cunha é bacharel em Engenharia de Software e aluno de pós-graduação em Computação na Universidade Federal do Rio Grande - FURG (rcrafhaelrc@gmail.com)

Roger S. da Silva é bacharel em Engenharia de Computação e aluno de pós-graduação em Computação na Universidade Federal do Rio Grande - FURG (rogersadasilva@gmail.com)

Rodrigo M. Rabenhorst é bacharel em Análise de Sistemas e aluno de pós-graduação em Computação na Universidade Federal do Rio Grande - FURG (rodrigoraben@gmail.com)

Alex D. Camargo é bacharel em Sistemas de Informação e aluno de pós-graduação em Computação na Universidade Federal do Rio Grande - FURG (alexcamargoweb@gmail.com)

Além do modelo baseado em equações, atualmente no mundo computacional existe a pré-disposição de representar as dinâmicas populacionais também através de modelos baseados em agentes. O objetivo do trabalho é elencar as vantagens e desvantagens na comparação entre os modelos implementados, baseados em agentes, e o modelo baseado em equações de Lotka-Volterra, já existente, sobre a dinâmica presa-predador.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: o capítulo II aborda a revisão bibliográfica inerente ao tema proposto, seguido do capítulo III no qual a implementação é demonstrada, logo após, no capítulo IV, discutiremos os resultados obtidos e a comparação entre os modelos e, por fim, no capítulo V são expostas as conclusões acerca deste trabalho.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda conceitos que serão expostos no decorrer deste trabalho.

A. Sistemas Biológicos

Existem vários mecanismos para o controle de populações em sistemas biológicos: distribuição do alimento; densidades das populações; voracidade e capacidade de percepção dos predadores; capacidade de reprodução e fuga das presas; dentre outros mecanismos [4].

Um pesquisador interessado em prevenir grandes epidemias de cólera, por exemplo, pode sacrificar a generalidade, em troca de um modelo que lhe dê informações precisas e realistas acerca do comportamento da doença [1].

Por outro lado, por exemplo, outro pesquisador interessado em entender a relação de presa-predador em corais (onde existem mais predadores do que presas), pode sacrificar a precisão, para obter informações sobre o mecanismo que impera nesse sistemas biológicos. Dessa forma, para saber qual atributo um modelo deve priorizar, o pesquisador deve saber qual pergunta ele está esperando responder [3].

B. Modelos baseados em equações

Os modelos baseados em equações são utilizados para descrever sistemas dinâmicos, como dinâmicas populacionais e sistemas sociais, através de um conjunto de variáveis matemáticas, relacionadas por equações diferenciais, e suas variações no tempo [5].

C. Modelos baseados em agentes

Os modelos baseados em agentes fazem uso da tecnologia de sistemas multiagente para descrever a estrutura e o funcionamento de dinâmicas populacionais ou sociais, através da combinação de organização espacial e/ou social dos agentes e seus comportamentos e interações [6].

D. Modelo de Lotka-Volterra

Inicialmente, Lotka (1925) e Volterra (1926) estudaram a dinâmica dos modelos de predação, sendo que algum tempo depois, Nicholson e Bailey (1935) formularam modelos que reproduziam a dinâmica hospedeiro-parasitóide. Já Murdoch, Chesson e Chesson (1985) discutiram as implicações ecológicas sob o aspecto da modelagem matemática no controle biológico [2] [7].

O formalismo teórico mais conhecido sobre este sistema é o de Lotka-Volterra que demonstramos matematicamente a seguir, baseando em [8], onde N representa o número de presas e P o número de predadores:

$$\frac{dN}{dt} = k_1 N \quad (1)$$

Na Eq. (1) k_1 representa a taxa de nascimentos das presas. Neste modelo assume-se que a ausência de predadores resulta no crescimento exponencial das presas.

$$\frac{dN}{dt} = k_1 N - k_3 NP \quad (2)$$

No modelo em evidência, as presas são mortas pelos predadores proporcionalmente ao número de encontros entre ambos, segundo a taxa de predação definida por k_3 na Eq. (2).

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = k_1 - k_3 P \quad (3)$$

Assim, conclui-se que o crescimento per-capita das presas é uma função decrescente da densidade populacional do predador, conforme comprovado em Eq. (3).

Abordando as equações relativas à população dos predadores, constata-se que esta população declina exponencialmente na ausência de presas, representada pela taxa de mortalidade k_2 , segundo demonstrado na Eq. (4).

$$\frac{dP}{dt} = -k_2 P \quad (4)$$

Segundo a mesma abordagem, percebe-se que a população de predadores aumenta proporcionalmente à disponibilidade de presas para a predação, propiciada pelos encontros ocorridos entre as duas espécies.

Nem todos estes encontros, porém, representam um real crescimento populacional aos predadores, uma vez que a predação é influenciada pela taxa de predação (k_3) e pela eficiência de predação (k_4), demonstradas na Eq. (5).

$$\frac{dP}{dt} = k_3 k_4 NP - k_2 P \quad (5)$$

Da mesma maneira, conclui-se que em relação aos predadores, o crescimento per-capita destes é uma função crescente da densidade populacional das presas, dada pela Eq. (6).

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = k_3 k_4 N - k_2 \quad (6)$$

Em suma, o modelo de Lotka-Volterra é determinado matematicamente através do par de Eq. (7) e (8).

$$\frac{dN}{dt} = k_1 N - k_3 NP \quad (7)$$

$$\frac{dP}{dt} = k_3 k_4 NP - k_2 P \quad (8)$$

Dadas as equações citadas nesta seção, observamos que o modelo presa-predador de Lotka-Volterra mensura a relação interativa entre duas espécies, a partir de estimativas da força de interação entre elas. Este modelo parte do princípio de que a variação populacional dos predadores está atrelada à variação populacional da presa. Baseando-se nisso, é esperada uma dinâmica oscilatória para ambas as populações ao longo do tempo [9].

E. Ferramenta NetLogo

O NetLogo é um ambiente de modelagem programável multiagente. Ele é particularmente bem adequado para modelar sistemas complexos que se desenvolvem ao longo do tempo [10] Sua linguagem de programação inclui muitas estruturas e primitivas de alto nível que reduzem o esforço de programação, além de disponibilizar uma extensiva documentação. A linguagem contém muitos recursos, entretanto não pode ser comparada a uma linguagem de programação padrão, embora seja considerada uma das plataformas mais profissionais em sua aparência e documentação na área de programação multiagente [11].

F. Dinâmica presa-predador: o modelo de dinâmica de sistemas no NetLogo

Para a realização deste trabalho utilizamos o modelo de Lotka-Volterra, chamado de *Wolf Sheep Predation (System Dynamic)*, já implementado na ferramenta NetLogo, como o modelo base de comparação para as implementações propostas. O modelo em questão especifica a relação matemática presente no sistema predador-presa, conforme figura 1, utilizando as ferramentas de modelagem de sistemas dinâmicos disponíveis no software NetLogo.

De acordo com a figura 1, as populações neste modelo são ilustradas como lobos (wolves), que representam os predadores, e as ovelhas (sheep), que desempenham o papel das presas. Tendo como referência o modelo matemático da seção II-E, a variável N representa as ovelhas e a variável P , os predadores.

A variável “ovelhas”, representada pelo retângulo “sheep” na figura 1, é influenciada positivamente pelo fluxo “sheep-births” e negativamente pelo fluxo “sheep-deaths”, respectivamente representados como as parcelas positiva e negativa da Eq. (2). Na parcela positiva da Eq. (2), o parâmetro “sheep-birth-rate”, ilustrado por um losango na figura 1, é representado por k_1 . Já na parcela negativa da mesma equação, o parâmetro “predation-rate”, também ilustrado como um losango na figura 1, é representado por k_3 .

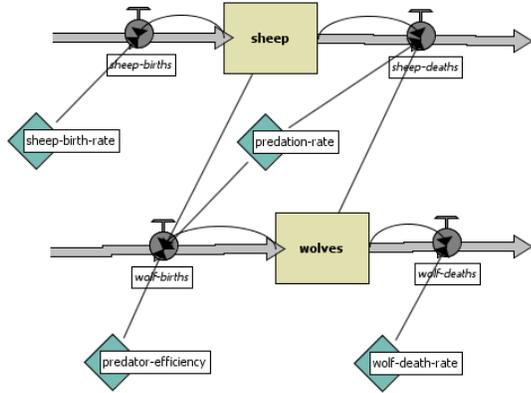


Figura 1. Modelo baseado em equações Wolf Sheep Predation (System Dynamic): Representação gráfica [10].

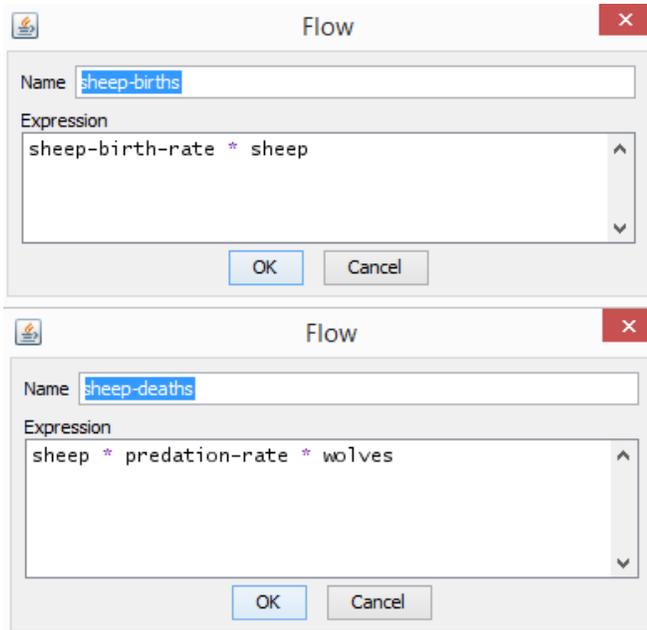


Figura 2. Representação da Eq. (2) no NetLogo, através da definição dos fluxos referentes à espécie Ovelha [10]

A figura 2 demonstra a representação da Eq. (2) nos fluxos do sistema dinâmico, citados anteriormente.

Da mesma forma, a variável “lobos”, representada pelo retângulo “wolves” na figura 1, é influenciada positivamente pelo fluxo “wolves-births” e negativamente pelo fluxo “wolves-deaths”, respectivamente representados como as parcelas positiva e negativa da Eq. (5). Na parcela positiva da Eq. (5), os parâmetros “predation-rate” e “predator-efficiency”, ilustrados por losangos na figura 1, são representados por k_3 e k_4 , respectivamente. Já na parcela negativa da mesma equação, o parâmetro “wolf-death-rate”, também ilustrado como um losango na figura 1, é representado por k_2 .

A figura 3 demonstra a representação da Eq. (5) nos fluxos do sistema dinâmico, citados anteriormente.

Os valores iniciais que estes parâmetros assumem no mo-

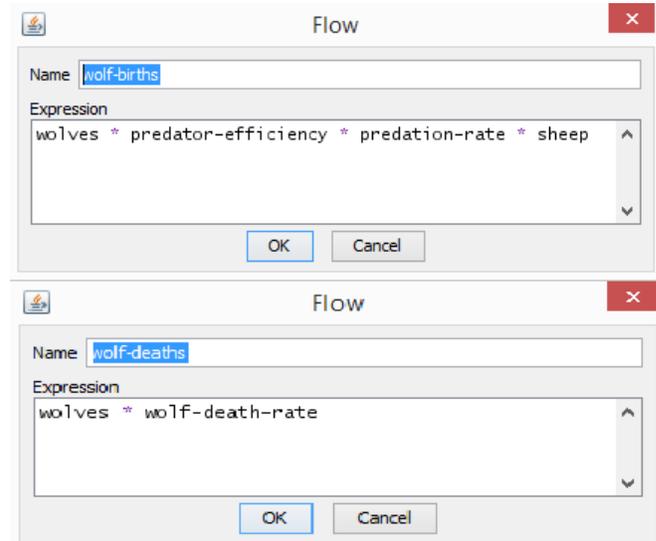


Figura 3. Representação da Eq. (5) no NetLogo, através da definição dos fluxos referentes à espécie Lobos [10]

delo estão elencados na tabela I.

Tabela I
VARIÁVEIS E PARÂMETROS INICIAIS DO MODELO DE EQUAÇÕES

Descrição	Parâmetro / Variável	Valor inicial
População inicial das presas	sheep	100
População inicial dos predadores	wolf	30
Taxa de nascimento das presas	sheep-birth-rate	0.4
Taxa de predação	predation-rate	3.0e-4
Eficiência da predação	predator-efficiency	0.8
Taxa de mortalidade dos predadores	wolf-death-rate	0.15

Valores iniciais dos parâmetros e variáveis do modelo baseado em equações. A coluna Valor inicial apresenta os dados especificados no modelo disponibilizado na ferramenta NetLogo [10]

O funcionamento do modelo ocorre conforme segue. A cada tick, ciclo de tempo de execução na ferramenta NetLogo, ocorre o nascimento das presas segundo a sua taxa de nascimento, contribuindo positivamente na quantidade total da população das presas. Da mesma forma, ocorre a morte dos predadores segundo a sua taxa de mortalidade, que contribui negativamente na quantidade total da população das presas.

Ainda no mesmo ciclo de execução, segundo a taxa de predação e a eficiência de predação do modelo, ocorre tanto a morte das presas quanto o nascimentos dos predadores, pois ambos processos são influenciados por estes dois parâmetros que, conjuntamente, representam os encontros entre predadores e presas.

Assim, ao longo de 693 ciclos de execução, é possível notar o funcionamento da dinâmica populacional do modelo, evidenciando um equilíbrio oscilatório cíclico entre as quantidades de populações de presas e de predadores, conforme a figura 4. O valor mínimo alcançado pela população de predadores é de 0,577 e o máximo atingido pelas presas é 2133.

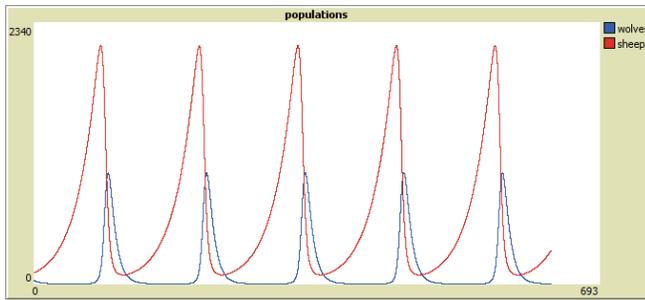


Figura 4. Equilíbrio oscilatório cíclico das populações de predadores e presas no modelo baseado em equações [10]

III. IMPLEMENTAÇÃO

Conforme abordado na seção I, o objetivo deste trabalho é comparar os modelos baseados em equações com os baseados em agentes, através da implementação da dinâmica presa-predador em um modelo baseado em agentes. Para tanto, foram realizados dois experimentos descritos a seguir.

A. Representação do modelo em equações utilizando agentes

Para construir este experimento, foi necessário representar as características explícitas do modelo de equações adaptando-as ao modelo de agentes. Para tanto, criou-se duas breeds distintas chamadas presas e predadores que representam respectivamente as variáveis sheeps e wolves do modelo de equações.

Os parâmetros sheep-birth-rate, wolf-death-rate, predation-rate e predator-efficiency presentes no modelo de equações do NetLogo, foram representados através de variáveis intituladas k_1 , k_2 , k_3 e k_4 respectivamente no modelo de agentes. As variáveis criadas mantêm a mesma semântica existente no modelo de equações.

Na prescrição do modelo de equações foi observado que dois comportamentos vinculados à taxa de predação (morte das presas e nascimento dos predadores), apresentam ambas as variáveis da quantidade populacional relacionadas a cada um desses comportamentos, indicando assim a necessidade de um "encontro" para que ocorra o ato de predação entre as duas espécies.

Para finalizar a representação do modelo de equações levando em consideração a necessidade do encontro, criou-se um ambiente no modelo de agentes onde as duas raças de agentes se deslocam com direção randômica, propiciando os encontros necessários para ocorrer o ato de predação, conforme figura 5.

Com o intuito de dar agilidade às simulações realizadas utilizamos diversos componentes nativos do NetLogo, como por exemplo, slider (n-presas, n-predadores, k_1 , k_2 , k_3 e k_4), monitor (população de presas e predadores) e plotter (gráficos das quantidades populacionais e dos números de encontros entre as espécies).

As taxas que determinam a variação do comportamento das espécies presentes no modelo de equações são representadas através de equações matemáticas. Entretanto, para a sua utilização no modelo de agentes, é necessário que ocorra a

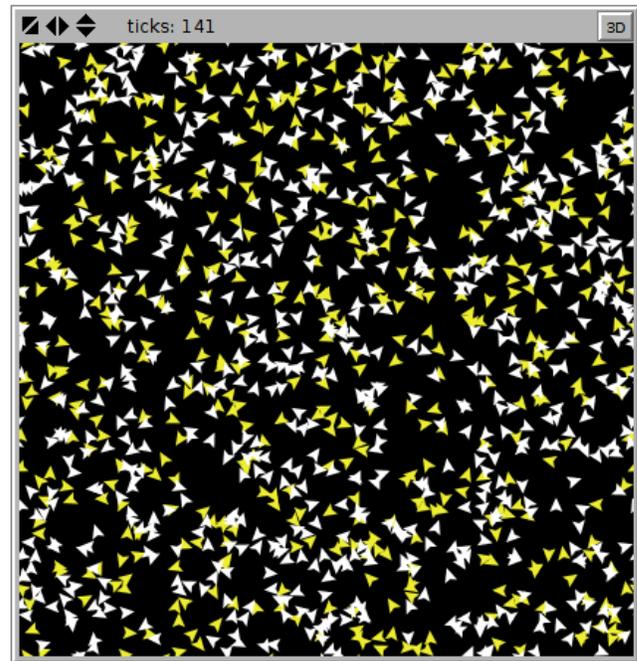


Figura 5. Ambiente da primeira implementação: agentes brancos representam os predadores e amarelos representam as presas

```

;nascimento de presas
if (random 100) <= k1 [
  hatch 1 [
    set color yellow
    setxy random-xcor random-ycor
  ]
]

```

Figura 6. Exemplo da implementação da taxa k_1 no NetLogo utilizando probabilidade

conversão destas taxas em probabilidades, conforme exemplo da figura 6.

Após alguns experimentos realizados com esta implementação, parametrizou-se as variáveis de acordo com a figura 7.

B. Representação do modelo de equações utilizando agentes: aprimorando comportamentos

Os aprimoramentos nos comportamentos foram realizados através de concretizações inseridas em substituição aos comportamentos abstratos presentes no modelo de equações. Estas concretizações são:

- Capacidade de percepção do predador: utilizou-se a função reservada `in-cone` do NetLogo nos predadores, para simular um raio de visão/percepção em relação às presas.
- Capacidade de caça do predador: caso presas sejam percebidas no raio de visão do predador, este direciona-se à presa alvo e acelera o seu passo de movimentação, simulando o ato de caça.



Figura 7. Parametrização das variáveis das implementações no ambiente NetLogo

- Inclusão de terreno heterogêneo: com o intuito de criar uma zona de refúgio para as presas, adicionou-se uma imagem para representar um mapa no ambiente do NetLogo, com uma área central destacada na cor vermelha, que simula a área de refúgio.
- Comportamento de fuga da presa: as presas, por definição, conhecem a direção da área de refúgio e durante a sua movimentação se deslocam direcionadas a esta área de maneira arbitrária.

Após a inclusão das concretizações citadas acima, conforme figura 8, verificamos a necessidade de estabelecermos algumas limitações no comportamento dos agentes, tais como: não é permitido o nascimento de presas e predadores no local de refúgio, bem como a movimentação dos predadores dentro desta área.

IV. ANÁLISE COMPARATIVA

Com a realização deste trabalho, podemos concluir que os modelos presa-predador baseado em equações e agentes não devem ser tratados unicamente como modelos mutuamente exclusivos, porém como modelos que podem ser fortemente conectados, fato evidenciado pela similaridade entre ambas dinâmicas a ser abordada na subseção A.

A. Uma breve comparação entre o modelo baseado em equações e a primeira implementação

Na comparação entre a nossa primeira implementação da dinâmica presa-predador com agentes versus o modelo de equações, utilizando um mínimo de concretizações possíveis, simulou-se um nível de abstração semelhante ao encontrado no modelo de equações. Comprova-se esta afirmação analisando o

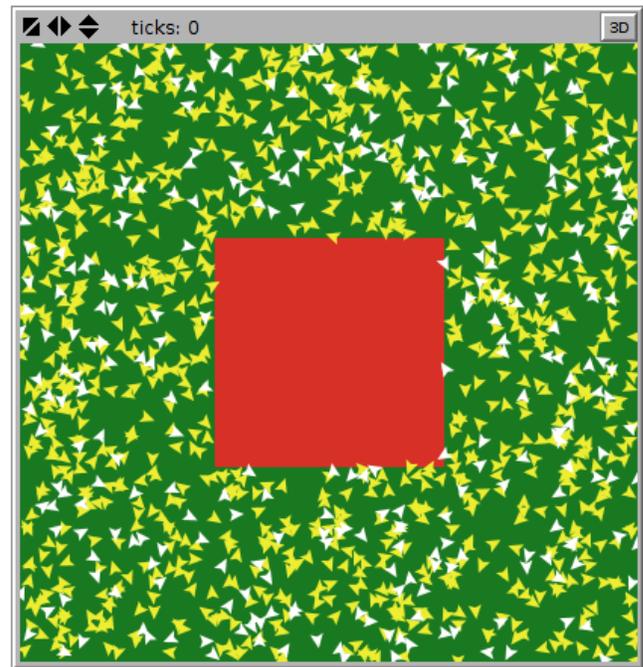


Figura 8. Ambiente da segunda implementação: agentes brancos representam os predadores e amarelos representam as presas

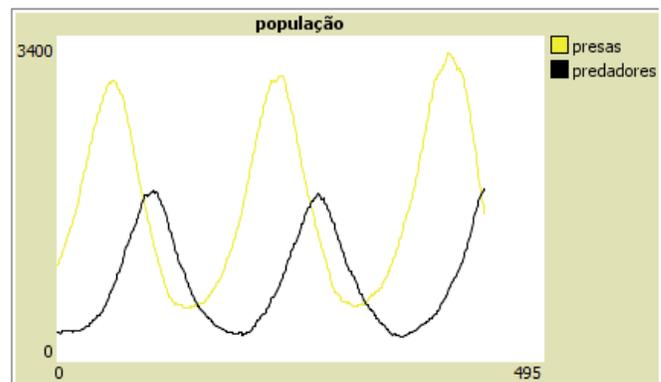


Figura 9. Gráfico demonstrativo da dinâmica presa-predador com agentes

comportamento das curvas representativas das populações das espécies do modelo analisado, segundo os gráficos presentes nas figuras 4 e 9.

Esta semelhança entre as dinâmicas, vista comparando-se as figuras 4 e 9, não foi obtida de forma aleatória. Partiu-se da premissa que é necessário levar em consideração a densidade populacional no modelo baseado em agentes, sendo assim, os ajustes nas variáveis das quantidades populacionais foram realizados considerando as dimensões do ambiente.

B. Uma breve comparação entre o modelo baseado em equações e a segunda implementação

Tendo em mente que o modelo baseado em agentes requer concretizações e a ferramenta NetLogo é própria para este tipo de prática, a nossa segunda implementação buscou um refinamento nas características e comportamentos das espécies e no ambiente.

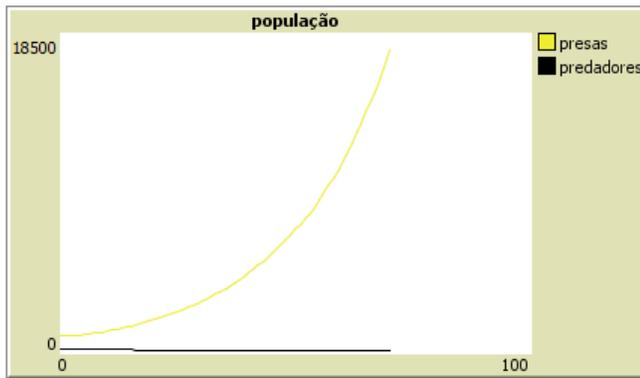


Figura 10. Gráfico demonstrativo da dinâmica presa-predador com as concretizações inseridas

Os resultados desta implementação podem ser vistos na figura 10. Conforme observado, com as concretizações inseridas no contexto a fim de especializar o modelo, perdeu-se a semelhança de comportamento em relação ao modelo de equações, ilustrado na figura 4. Nota-se que a população de predadores, após somente 100 ciclos de execução, encontra-se zerada, ao passo que a população de presas cresce exponencialmente, alcançando 18500.

Explica-se este comportamento divergente em relação ao modelo anterior em decorrência do acréscimo das características como: heterogeneidade do ambiente, densidade populacional e percepção dos agentes em relação à caça ou fuga. Tais características influenciam diretamente na frequência de encontros entre os agentes predadores e presas.

Assim, a mudança nos encontros altera a dinâmica populacional, uma vez que a predação se dá proporcionalmente ao número de encontros entre os agentes, tornando o comportamento deste modelo distinto ao modelo anterior e, especialmente, ao modelo baseado em equações.

Em resumo, percebeu-se que os modelos baseados em equações são abstratos, ou seja, não consideram: limites de variáveis, comportamentos individuais e características do espaço. Dessa forma, são propícios a serem utilizados em simulações onde essas características podem ser abstraídas.

A respeito dos modelos baseados em agentes percebeu-se que são utilizados para representação de modelos concretos, ou seja, as características do espaço e comportamento dos indivíduos são consideradas nessa forma de representação, pois criam comportamentos que podem influenciar as dinâmicas populacionais analisadas.

V. CONCLUSÃO

De acordo com a seção I, o objetivo deste trabalho é fazer um comparativo elencando os pontos positivos e negativos em relação ao modelo de equações e o modelo de agentes, considerando a dinâmica presa-predador proposta por Lotka-Volterra.

Para tanto, implementou-se dois protótipos na ferramenta NetLogo que buscavam simular o comportamento do modelo presa-predador de equações em um modelo com agentes. O

primeiro protótipo preocupou-se exclusivamente em minimizar as concretizações, tornando-o muito semelhante ao nível abstrato presente no modelo de equações.

No segundo protótipo aumentou-se as concretizações, gerando maior complexidade no comportamento individual dos agentes; essa ação resultou em um nível de abstração muito baixo do protótipo, acarretando em uma rasa similaridade se comparada ao modelo de equações.

Em suma, concluiu-se que ambos os modelos são complementares caso o nível de abstração do modelo de agentes seja alto, contrariando a ideia de que os modelos baseados em agentes e os modelos baseados em equações são mutuamente exclusivos.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo suporte financeiro na realização do presente trabalho. Agradecem, especialmente, ao professor Dr. Antônio Carlos da Rocha Costa, docente no Programa Pós-graduação em Computação do Centro de Ciências Computacionais da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, pela orientação e ideias na realização desse trabalho, e à professora Dra. Diana F. Adamatti, docente no Programa Pós-graduação em Computação do Centro de Ciências Computacionais da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, pelas revisões e correções sugeridas.

REFERÊNCIAS

- [1] A. L. Rodrigues, "Dinâmica de populações: modelo predador-presa estocástico e difusivo em um reticulado," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2009.
- [2] J. A. Neves, "Dinâmica predador presa, relações funcionais e o potencial de heterópteros no manejo de pragas," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2014.
- [3] A. L. M. d. Oliveira, "Estudo de um sistema de telefonia sem infraestrutura através de modelagem e simulação baseada em agentes," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2012.
- [4] T. Southwood and P. Henderson, "Ecological methods," 2000.
- [5] A. C. Costa, F. M. Jeannes, and U. A. Cava, "Equation-based models as formal specifications of agent-based models for social simulation: preliminary issues," in *Social Simulation (BWSS), 2010 Second Brazilian Workshop on*. IEEE, 2010, pp. 119–126.
- [6] G. Weiss, *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*. MIT press, 1999.
- [7] R. d. A. Moral, "Modelagem estatística e ecológica de relações tróficas em pragas e inimigos naturais," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2013.
- [8] Kozakevich, Daniel, "Interações entre as espécies," http://www.mtm.ufsc.br/~daniel/matap/pred_pres.pdf, acessado 14 outubro 2014.
- [9] P. J. Wangersky, "Lotka-volterra population models," *Annual Review of Ecology and Systematics*, pp. 189–218, 1978.
- [10] Netlogo Home Page, "Netlogo Home Page," <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, acessado 14 outubro 2014.
- [11] D. N. Costa, "Simulador extensível para navegação de agentes baseado em inteligência de enxames," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2007.