

Simulação do Espalhamento da Influenza na Cidade de Cascavel-PR Utilizando Agentes Computacionais

Marcos Paulo Nicoletti ¹
Claudia Brandelero Rizzi ¹
Rogério Luis Rizzi ²

Resumo: Este trabalho apresenta e discute resultados decorrentes de um experimento computacional em que o espalhamento da Influenza foi modelado a partir da concepção de modelos compartimentais tipo SIRS, empregando a abordagem de agentes computacionais baseados em modelos. Simulou-se o processo de espalhamento da gripe em uma região específica da cidade de Cascavel-PR, abrangendo parte de três bairros. Neste ambiente, interagiram 4.653 agentes de seis tipos distintos, os agentes bebês, crianças, adolescentes, jovens, adultos e idosos. Cada agente apresenta comportamentos específicos quanto ao deslocamento no ambiente, para fins de estudo, trabalho, lazer ou estada residencial. A transmissão da doença ocorre quando da interação entre indivíduos suscetíveis e infectados. Os principais resultados apontam que o modelo é conservativo, seus resultados são compatíveis com os apresentados na literatura relacionada e a conecto mobilidade dos indivíduos influencia fortemente na transmissão, difusão e sustentação ou não da doença. O acompanhamento do processo de simulação envolvendo a dinâmica espaço-temporal permitiu inferir relações associadas ao ambiente simulado. Análises foram realizadas a partir de resultados obtidos e já foram iniciados trabalhos visando mapear e caracterizar melhor o município bem como validar o modelo através de dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Saúde.

¹Colegiado de Ciência da Computação (CCET), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 85819-110, PR
{marcos.nicoletti, claudia.rizzi@unioeste.br}

²Colegiado de Matemática (CCET), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 85819-110, PR
{rogerio.rizzi@unioeste.br}

Abstract: This paper presents and discusses the main results of a computational experiment in which the spread of influenza was modeled using SIRS compartmental model type, employing the approach of computational agents based models. There was a simulation of spreading influenza in a specific region of Cascavel-PR-Brazil, covering part of three quarters. In this environment, 4653 agents of six distinct types, babies, children, teenagers, adults and seniors, interacted with each other. Each agent has specific behaviors regarding the environment movement, for study, work, leisure or residential stay. Transmission of the disease occurs when there is proper contact between infected and susceptible individuals. The main results show that the model is conservative, their results are consistent with those presented in the literature and the connections and mobility of individuals strongly influences the transmission, distribution and support or not the disease. The monitoring of the simulation process involving the spatiotemporal dynamics allowed us to infer relationships associated with the simulated environment. Analyses were performed from results and have already started work aiming to map and better characterize the city and to validate the model using data provided by the department responsible for health in the city of Cascavel.

1 Introdução

A epidemiologia estuda o processo de saúde e doença em coletividades humanas objetivando analisar a distribuição e os fatores determinantes das enfermidades, danos e eventos associados à saúde visando propor medidas preventivas, de erradicação ou controle, empregando indicadores que dão sustentação ao planejamento, gestão e avaliação de ações em saúde coletiva [1]. A epidemiologia se ocupa também em identificar e entender o agente causal e fatores relacionados aos agravos da saúde bem como identificar e explicar os padrões de distribuição geográfica das doenças.

Pesquisas realizadas sobre a transmissão de doenças infectocontagiosas envolvem a compreensão de características complexas incluindo padrões biológicos, ecológicos, geográficos, sociais e epidemiológicos. Alguns aspectos desses estudos podem ser realizados com o emprego da modelagem computacional, de modo a analisar variações e interrelações desses padrões, dentre outras caracterizações, na identificação de cenários que possam subsidiar ações e políticas públicas epidemiológicas.

A especificação de um modelo computacional requer a identificação das principais variáveis envolvidas, bem como a determinação das hipóteses que fundamentam a dinâmica do evento. Nessa especificação devem estar inclusas formulações (físicas, matemáticas, biológicas) apropriadas ao problema que são, então, representadas computacionalmente. Deste processo são obtidas simulações das quais são realizadas análises, previsões que são testadas e comparadas com dados experimentais ou com aqueles disponíveis na literatura técnica. Se o resultado é suficientemente bom para os propósitos determinados, a modelagem é aceita.

Caso contrário, ela é modificada e o ciclo se repete.

Uma metodologia empregada para representar a propagação de doenças é utilizar modelos compartimentais. Este tipo de abordagem baseia-se na divisão da população de hospedeiros em categorias, entre as quais os indivíduos fluem com taxas que dependem das características próprias da doença e das formas de transmissão, entre outros fatores. A população hospedeira é subdividida em classes, como a dos indivíduos suscetíveis (S), latentes (E), infectados (I) e removidos (R). Para populações fechadas considera-se que a quantidade indivíduos, N , é tal que $N = S + E + I + R$ [2].

Um modelo frequentemente empregado para simular a dinâmica do Influenza é o SIRS (Suscetível-Infectado-Recuperado-Suscetível), que é aquele resultante da modelagem de doenças em que os indivíduos infecciosos podem recuperar-se, porém não adquirem imunidade permanente, passando a ser suscetível após certo período. Exemplos de doenças sob essa categorização são as gripes, que adquiridas num período, conferem imunidade apenas parcial, visto que a população de indivíduos é suscetível (parcial ou totalmente) a uma nova cepa do vírus. O fluxo do modelo SIRS com taxas vitais iguais considera as taxas μ , β , α e δ , onde μ indica a taxa de mortalidade e de natalidade constantes em todos estados, β é a taxa de contato entre os indivíduos no estado S e no estado I , α é a taxa de recuperação, quando indivíduos no estado I passam ao estado R e δ é a taxa de reinfeção, quando indivíduos passam do estado R para o estado S .

Para observar o comportamento da dinâmica populacional de indivíduos nessas categorias considerando-se aspectos e comportamentos inerentes às suas classes, deve-se tomar uma modelagem baseada em indivíduos, onde cada um dos elementos componentes da população é considerado. Essa abordagem pode ser fundamentada usando agentes computacionais, cujas ações individuais e autônomas que realizam no ambiente que compartilham, de uma perspectiva sistêmica, interferem no contexto global da dinâmica da transmissão e espalhamento da doença. Através dos agentes é possível especificar e validar, no modelo computacional proposto, as diferentes hipóteses relacionadas aos diversos tipos de agentes, seus atributos, regras de comportamento, interações e seus efeitos sobre os fatos observáveis no nível macro do sistema [3].

Considerando que a dinâmica da população é influenciada pela rede de contato, é relevante em um modelo baseado em indivíduos, a especificação de uma rede que leve em consideração os relacionamentos e contatos locais e globais que ocorrem em um ambiente. Para isso, pode-se implementar uma rede complexa do tipo rede de mundo pequeno (*small world*) [4]. Trata-se de uma estrutura topográfica não trivial composta por um conjunto de vértices que são interligados por arestas [5]. Neste tipo de rede, grande parte das conexões são estabelecidas entre vértices mais próximos, derivando o chamado mundo pequeno. Nesse modelo, a distância média entre quaisquer dois vértices de uma grande rede não ultrapassa um pequeno número de vértices. Para isso, basta que algumas conexões aleatórias entre grupos

sejam estabelecidas [6] viabilizando a conexão entre os vizinhos e aqueles indivíduos que não estão próximos a ele geograficamente mas estão do ponto de vista do contato.

Diversas são as pesquisas no sentido do desenvolvimento de modelos computacionais ou ambientes de simulação como o apresentado neste trabalho. Yuanzheng Ge e colaboradores apresentaram um ambiente para simulação utilizando sistemas multiagente tendo como motivação o surto de Influenza H1N1 que ocorreu na China em 2009. Modelaram um ambiente simulando uma sala de aula e nele, considerando dados estatísticos, construíram um agente professor e agentes alunos. A sala de aula foi concebida em três partes: os agentes, o meio ambiente, e o modelo de emergência. Consideraram questões temporais, comportamento social e de grupo, com base em redes sociais. Os resultados dos experimentos realizados indicaram que a propagação da gripe H1N1 em locais de alta densidade populacional está relacionada a atributos demográficos, comportamentos sociais e suas redes sociais [7].

Ainda em relação a China, Liu Tao, Li Xia e Liu XiaoPing, desenvolveram um sistema multiagente e nele integraram redes de mundo pequeno para simular, utilizando a abordagem dos modelos compartimentais, a transmissão espaço-temporal de epidemia de Influenza. As interações entre os indivíduos e suas regras de movimentação e de transição de estado foram modeladas nos agentes. Foram introduzidos e estudados os efeitos da infecção em associação com a distância e a relação social entre os agentes. Utilizaram o software *Swarm* e simularam o processo de transmissão da gripe na cidade de Guangzhou, na China. Concluíram que o modelo teve um desempenho melhor quando comparado com aqueles que utilizam o modelo SEIR tradicional ou aqueles que utilizam exclusivamente agentes, sem considerar as redes de contato. Inferiram uma forte relação entre a frequência da infecção e a densidade populacional, mostrando que há maior probabilidade de que um agente suscetível que tenha maior relação social seja infectado e que com a propagação da epidemia, a probabilidade de infecção de indivíduos com menor relação social aumenta gradualmente [8].

Já Khaled M. Khalil e colaboradores realizaram análises a partir de um experimento onde utilizaram agentes estocásticos e uma extensão do modelo SIR para simular a propagação da pandemia de gripe H1N1 ocorrida recentemente no Egito. O objetivo era simular o impacto das decisões tomadas pelas autoridades de saúde na população. Utilizando 1000 agentes sendo 3 infectados inicialmente, verificaram que o auge da infecção (608 agentes) aconteceu no décimo dia, sem a adoção de estratégias de controle. Neste caso, foram 658 agentes mortos ao final da simulação. Concluíram que uma combinação adequada de controle e estratégias pode limitar as consequências da pandemia e reduzir as mortes e prejuízos econômicos dela decorrentes. Como trabalhos futuros, pretendiam melhor caracterizar os agentes incluindo informações como idade, gênero, entre outros, visando encontrar uma combinação ótima de estratégias de controle para administrar os surtos da doença [9].

No tocante ao desenvolvimento de modelos conceitualmente mais apropriados à transmissão da Influenza e circulação de distintos sorotipos, Renato Casagrandi e colaboradores

desenvolveram um modelo de equações diferenciais ordinárias para estudar as conseqüências epidemiológicas do espalhamento do vírus Influenza A. Visando melhorar a modelagem SIR, introduziram uma quarta classe, a C , para representar indivíduos com imunidade cruzada, ou seja, aqueles que tendo se recuperado, tornam-se suscetíveis a nova infecção por diferentes cepas. Discutiram questões como os limiares do valor basal e efeitos da sazonalidade, entre outras caracterizações. Concluíram que as simulações realizadas foram qualitativa e quantitativamente consistentes com a realidade para países tropicais e temperados e constataram que o aumento da imunidade cruzada tende a complicar a dinâmica do sistema [10].

O presente trabalho insere-se neste contexto de pesquisa. Ele apresenta resultados decorrentes da modelagem computacional do espalhamento da Influenza em uma região específica da cidade de Cascavel, Paraná, Brasil, empregando modelagem compartimental, agentes computacionais baseados em modelos e redes de contato de mundo pequeno. Os experimentos computacionais aqui apresentados foram realizados considerando dados obtidos na literatura ou aproximados visto que os dados fornecidos pela Prefeitura Municipal de Cascavel ainda estão em processo de organização e tratamento.

Este artigo está assim organizado. A seção dois apresenta, em linhas gerais, o modelo de agentes utilizado neste trabalho. Os detalhes teóricos deste modelo constarão em um trabalho que está sendo preparado para publicação. A seção três apresenta os parâmetros geográficos e dinâmicos que foram utilizados visando caracterizar, o mais adequadamente possível, o ambiente alvo do experimento realizado. A seção quatro explicita a conversão do modelo de agentes teórico em um modelo computacional. Sua subseção apresenta informações sobre o software desenvolvido, através do qual as simulações foram realizadas. A seção cinco apresenta resultados e discussões e a seção seis considerações finais e trabalhos futuros.

2 Agentes Baseados em Modelos

Agentes computacionais são entidades capazes de perceber e atuar no ambiente onde estão inseridos [11]. O modelo de agentes desenvolvido para representar a dinâmica da Influenza é aquele baseado em modelo, ou seja, o agente possui um estado interno que representa suas características individuais e que contribuem para que decida sobre qual ação deve realizar, considerando suas percepções acerca do ambiente. Mais especificamente, o agente, a partir de seu estado interno, interage com o ambiente, de modo que a percepção atual é combinada com esse estado interno para gerar uma descrição atualizada do estado atual. Cada agente implementa as operações de atividades por faixa etária, de transição de estados e de conecto-mobilidade, e tem uma cópia exata de um programa que implementa as operações

$\lambda = \rho \circ \sigma \circ \mu$ onde

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \equiv \text{operador de atividade por faixa etária} \\ \sigma \equiv \text{operador de transição de estados} \\ \mu \equiv \text{operador de conecto-mobilidade} \end{array} \right.$$

sendo que as caracterizações desses operadores são as seguintes:

- O operador ρ : designado de operador de atividades por faixas etárias, que realiza operações lógicas buscando avaliar os possíveis estados que um agente pode assumir, tomando-se as distintas possibilidades de realização de atividades em determinadas localidades considerando-se as diferentes faixas etárias do agente, sendo que assume uma única faixa etária ao longo da evolução.
- O operador σ : designado de operador de transição de estados, que realiza os contatos entre agentes, que podem estar em distintos estados, realizando ou não a transição de estado quando as taxas de infecção ou de recuperação ou de reinfeção forem adequadas.
- O operador μ : designado de operador de conecto-mobilidade, que realiza a distribuição dos agentes para os nodos pelas arestas, considerando-se aspectos de conectividade e mobilidade.

A operação de composição \circ entre os operadores ρ , μ e σ produz o operador de evolução global λ do estado, numa relação espaço-temporal do agente quando interagindo com o ambiente. Assim, se $x(\tau_{inicial})_l^f$ denota o estado de um agente em uma faixa etária f numa localidade (posição geográfica) l num subpasso de tempo τ inicial, e $\eta(\tau_{final})_l^f$ denota um estado desse agente numa faixa etária f numa posição geográfica l em um subpasso de tempo τ especifica-se o operador de evolução global λ , aplicado a $x(\tau)_l^f$ conforme a fórmula (1).

$$\lambda \left(x(\tau)_l^f \right) \equiv \mu \left[\sigma \left(\rho \left(\eta(\tau)_l^f \right) \right) \right] \quad (1)$$

Esse operador em geral não é bijetivo, pois é resultado de relações entre distintos atributos e que geralmente não são reversíveis. Para realizar uma simulação é necessário configurar certos parâmetros que estabelecem quais as condições iniciais do ambiente e do modelo interno do agente. Os principais são:

- Dados topológicos: que consistem na identificação de nodos, arestas, conectividade e mobilidade que são informações necessárias à determinação de quaisquer tipos de localidades e para estabelecer a conecto-mobilidade aos agentes para transportá-los às vizinhanças geográficas e lógicas.

- Dados de atividades por faixa etária: que consistem na especificação do comportamento do agente, estruturado por faixa etária, que atua diferentemente de acordo com seu posicionamento em determinadas localidades e período de tempo.
- Dados demográficos: que consistem na população estruturada por faixa etária. A distribuição considera o tipo de localidade onde os agentes atuam, respeitando-se os parâmetros da densidade média da população bem como o período de tempo.
- Dados epidemiológicos: que consistem na especificação das taxas de contato efetivo, de recuperação e de perda de imunidade, definindo a ocorrência ou não da transição entre os estados suscetível, infectante e removido.
- População inicial: que consiste na informação inicial das quantidades ou proporções de agentes nos estados suscetível, infectante e removido.

A construção do operador μ é realizada em termos de atributos topológicos do grafo e do fator de movimentação de indivíduos entre os nodos. A conecto-mobilidade local é realizada na estrutura de vizinhança geográfica. A conecto-mobilidade global interliga nodos geograficamente distantes, mas logicamente conectados à estrutura de vizinhança local, possibilitando conexões como redes do tipo mundo pequeno. O operador de conecto-mobilidade é definido pelo produto da conectividade pelo fator de movimentação pelo fator de ponderação das distâncias, sendo como $\mu_{\alpha,\beta}^l = c_{\alpha,\beta}^l m_{\alpha,\beta}^l \omega_{\alpha,\beta}^l$, onde a indexação α, β e l designa uma relação de vizinhança entre os nodos. O operador μ fornece uma especificação para a conecto-mobilidade de indivíduos entre os vários nodos do grafo, mas o movimento entre os nodos pelas arestas é implementado através de dois operadores, R e P , de randomização e propagação, respectivamente. A composição desses operadores, $P \circ R$, efetiva a movimentação dos agentes, sendo que a operação de randomização R é aplicada a cada nodo independentemente de outro, de modo que a população de indivíduos residentes num nodo é aleatoriamente distribuída para posições ou identificações que representam as arestas. Esse processo de redistribuição de indivíduos é probabilístico. Já a operação de propagação P é aplicada de modo que os indivíduos se movem simultaneamente de seus nodos para os nodos da vizinhança pelas arestas. O movimento de propagação é determinístico.

A construção do operador comportamental ρ é especificada em termos de operações lógicas, que considera duas categorias de atributos. O conjunto $FE = \{B, C, A, J, M, I\}$, onde tais símbolos designam faixas etárias de bebês B , crianças C , adolescentes A , jovens adultos J , adultos maduros M e idosos I , respectivamente. Para estruturar a população nessas faixas consideraram-se os seguintes intervalos, em anos de idade: $0 \leq B < 6$, $6 \leq C < 14$, $14 \leq A < 18$, $18 \leq J < 30$, $30 \leq M < 60$ e $I \geq 60$, respectivamente. E o conjunto $LT = \{CA, CR, ES, FA, TR, LZ\}$, onde tais símbolos designam os possíveis tipos de localidades onde os agentes estarão residindo num dado intervalo de tempo. Para distribuir a população, considerando-se as possíveis faixas etárias, especificou-se que as localidades

são do tipo casa CA , creche CR , escola ou colégio ES , faculdade ou universidade FA , trabalho TR e lazer LZ . Note que $l \in LT$, e um ciclo de evolução, que corresponde a um dia de simulação na realização de um determinado cenário é subdividido em quatro subciclos τ , de tal modo que τ_1, τ_2, τ_3 e $\tau_4 \in T_d$, o conjunto dos níveis de tempo de um ciclo de evolução. Assim, $T_d \in [0, t_{final}]$, o conjunto dos passos de tempo realizados na construção daquele evento. As operações lógicas empregadas para implementar o operador ρ , quanto a possibilidade de faixas etárias e localidades empregadas nesta modelagem são do tipo booleano, que podem ser substituídas por outras mais adequadas como as da lógica fuzzy.

A construção do operador de transição σ é realizada em termos de características e fatores inerentes à dinâmica da propagação da doença. Realiza a transição entre situação ou estado em que um indivíduo se encontra. Considerando uma modelagem compartimental para obter um modelo do tipo $SIRS$, um indivíduo pode estar, num nível de tempo τ no estado suscetível $S(\tau)$, ou no estado infectante $I(\tau)$ ou no estado removido $R(\tau)$, sendo que um estado exclui um outro no mesmo nível de tempo τ . Os principais fatores relacionais que atuam na transição entre os possíveis estados são:

- A força de infecção $\beta \in [0, 1]$ especificada como $\beta = \tilde{\beta} \frac{I_l}{M_l}$, que designa o número médio de contatos suficientes para que ocorra a transmissão da doença. Esse fator é modelado pela taxa de contato $\tilde{\beta}$ e pela relação entre a quantidade de casos favoráveis pela quantidade de casos possíveis, ou seja, a razão entre a quantidade de indivíduos infectantes I_l e a quantidade total de indivíduos num dado nodo M_l .
- A taxa de recuperação $\alpha \in [0, 1]$, que representa a quantidade de indivíduos por unidade de tempo, que deixam a classe dos infectantes por cura, convalescença, entre outros fatores, fluindo da classe dos infectados para a classe dos recuperados.
- A taxa de perda de imunidade $\delta \in [0, 1]$, que leva em conta o fato que a imunidade não é permanente e, portanto, indivíduos recuperados perdem a imunidade após certo período de tempo, voltando a ser suscetíveis, podendo vir a se reinfectar.

Considerando que $\eta \in \{S, I, R\} = Q$ então $\eta(0) \in \{S(0), I(0), R(0)\} = Q(0)$ designa o instante inicial $\tau_{inicial} = 0$, a modelagem realizada e seus respectivos algoritmos fornece uma completa atualização dos estados de quaisquer indivíduos de tal modo que o operador de evolução global λ , aplicado a indivíduo no estado $\eta(\tau)_i^f \in \{S(\tau), I(\tau), R(\tau)\} = Q(\tau)$ é avaliado pelo operador de evolução global $\lambda(x(\tau)_i^f)$, de modo que quando um determinado agente encontra-se numa faixa etária numa posição geográfica em um subpasso de tempo, o operador de evolução global realiza as transições para cada passo discreto de tempo. Isso determina completamente um cenário na simulação, que é o estado final de uma evolução.

Observe-se que numa implementação computacional via *threads* dos agentes, como o caso do presente trabalho, não existe um controle centralizado para decidir quais agentes sofrerão a atualização de estado. Essa questão pode ser problemática para um *agente baseado em modelo* com regra de atualização determinística quando se tem vários indivíduos por nodos, pois embora o operador $\rho(\eta(\tau)_i^f)$ possa determinar sem ambiguidades se um determinado indivíduo deve realizar uma transição, sem um controle específico sobre cada indivíduo não se pode dizer quem é atualizado. Para superar este obstáculo numa implementação de multiagentes via *threads* sem controle centralizado as transições devem ocorrer de modo probabilístico, sendo nesse caso suficiente um agente Timer para realizar o registro do avanço temporal, de modo que todos os agentes tomem conhecimento sobre as alterações dos períodos de tempo no ambiente. Um controle análogo foi especificado para o agente Compartmental que armazena as quantidades de agentes em cada um dos três compartimentos possíveis no final de cada período (um dia) da simulação.

3 Parâmetros Geográficos e Dinâmicos

Cascavel é uma cidade situada no oeste do estado do Paraná. Possui 2.091 km² de área territorial e dista 490 km da capital. Seus aproximadamente 286.205 habitantes residem em 100.931 domicílios. Entre creches, escolas de ensino pré-escolar, fundamental e médio, existem 194 estabelecimentos oficialmente registrados. São 8 as instituições de ensino superior. A população economicamente ativa se ocupa de atividades ligadas ao comércio, indústria de transformação, agricultura, pecuária, construção civil e prestação de serviços. São aproximadamente, 115.000 indivíduos que trabalham na zona urbana. Há 9.000 estabelecimentos que realizam atividades econômicas. A densidade demográfica é de 138,35 hab/km², o grau de urbanização é de 94,36% e o índice de desenvolvimento humano (IDH-M) é de 2.000 [12], [13].

Em 2009, ano em que se iniciou o registro da Influenza como doença com notificação compulsória, Cascavel teve 5.089 casos notificados e 4.081 casos confirmados da doença. Tratou-se de uma pandemia que preocupou a população, exigiu intervenção específica por parte da vigilância epidemiológica do município e motivou o presente trabalho de modelagem e simulação. Embora a doença tenha acometido indivíduos espalhados em todo o município, optou-se por realizar um primeiro experimento envolvendo uma parte geográfica da cidade, o centro dela, onde residem e circulam grande quantidade de pessoas por dia. Esta área, que abrange parte de 3 bairros, é ilustrada pela figura 1, onde se destacam as 60 quadras consideradas no experimento e seu arruamento.

Para a caracterização dos agentes envolvidos na simulação conforme definido no modelo teórico (seção dois), especificou-se 6 tipos distintos: agentes bebês, crianças, adolescentes, jovens, adultos e idosos. Considerando que a quantidade total de habitantes dos três

estada, ou seja, se não atingiu a quantidade máxima de agentes que é capaz de abrigar. A tabela 2 mostra o relacionamento entre faixa etária \times período \times locais de permanência, de cada tipo de agente em cada período do dia.

Tabela 2. Tabela para o relacionamento entre faixa etária x período x locais de permanência elaborada a partir de informações divulgadas pela Prefeitura Municipal de Cascavel, ENADE e IBGE sobre a cidade de Cascavel/PR.

Agente (tipo)	Idade (anos)	Manhã	Tarde	Noite	Madrugada
Bebês Total = 268	Menores de 6	Residência: 188 ou Creche: 80	Residência: 188 ou Creche: 80	Residência: 268	Residência: 268
Crianças Total = 477	De 6 até menores que 14	Residência: 24 ou Estudo: 453	Estudo: 453 ou Lazer: 24	Residência: 477	Residência: 477
Adolescentes Total = 222	De 14 até menores de 18	Estudo: 211 ou Residência: 11	Estudo: 211 ou Lazer: 11	Residência: 222	Residência: 222
Jovens Total = 1129	De 18 até menores de 30	Estudo: 226 ou Trabalho: 903	Estudo: 226 ou Trabalho: 903	Estudo: 226 ou Residência: 903	Residência: 1073 ou Lazer: 56
Adultos Total = 1990	De 30 até menores de 60	Trabalho: 1871 ou Residência: 119	Trabalho: 1871 ou Residência: 119	Residência: 1592 ou Lazer: 398	Residência: 1891 ou Lazer: 99
Idosos Total = 567	Maiores de 60	Residência: 567	Residência: 482 ou Lazer: 85	Residência: 567	Residência: 567

Visando estimar a expectativa da quantidade aproximada de agentes a se deslocarem por período de tempo, foram feitas as seguintes considerações, das quais decorrem os valores apresentados na tabela 2.

- A taxa de frequência às creches municipais do Município de Cascavel em 2011 é de 30% das crianças menores de 6 anos, calculadas a partir dos dados do Censo de 2010. Neste caso, no máximo 80 agentes bebês poderiam estar nas creches nos períodos da manhã e tarde.
- Pelas informações obtidas na documentação ENADE 2010 [14], 95% das crianças e adolescentes na faixa etária correta frequentam às escolas. Assim, 453 agentes crianças e 211 agentes adolescentes devem estar presentes nas Instituições de Ensino, nos períodos adequados. Para as atividades de Lazer, no período da tarde, foram considerados 5% do total de cada um dos tipos destes agentes.
- Segundo o IBGE [15], no Paraná, 19,9% dos jovens estudam nos períodos da manhã, tarde ou noite. Isso fornece 226 agentes nesta faixa etária. Além disso, considerou-se

que 80% dos agentes jovens trabalham nestes períodos. No período de madrugada, para as atividades de lazer, apenas 5% deles estão em tal atividade.

- Pelas informações divulgadas pelo ministério do desenvolvimento [16], 6% dos adultos em 2011 estavam desempregados. Tomando essa proporcionalidade, considerou-se que 1871 agentes adultos trabalham no período da manhã ou tarde. À noite considerou-se que 80% deles estão estudando e 20% estão em atividades de lazer. Na madrugada, 95% estão em suas residências e 5% em atividades de lazer.
- Quanto aos agentes idosos, considerou-se que na parte da tarde, 5% estão em atividades de lazer.

Embora o modelo permita a inserção de taxas vitais (natalidade e mortalidade), para os experimentos apresentados neste trabalho elas não foram consideradas por dois motivos que se relacionam. Os dados reais sobre a ocorrência da doença em Cascavel/PR, que viabilizam a parametrização adequada dessas taxas ainda não estavam disponíveis. Assim, os testes foram enfatizados focando a verificação da conservatividade do modelo.

4 Ambiente Computacional

A implementação computacional do ambiente de simulação utilizado neste trabalho foi desenvolvida na linguagem Java e utiliza o framework Java Agente DEvelopment Framework (JADE) [17] para a manipulação de agentes. A biblioteca JFreeChart [18] foi utilizada para geração de gráficos e o acompanhamento do espalhamento espaço-temporal da doença foi feito através do armazenamento da sequência de *frames* que são gerados para cada dia de uma simulação.

A simulação desenvolvida emprega modelos compartimentais para a modelagem da dinâmica da Influenza, agentes reativos baseados em modelos para a modelagem dos agentes computacionais e redes de mundo pequeno (*small world*) para representar redes de contato entre indivíduos. A dinâmica espaço-temporal das interações entre os indivíduos ocorre em locais residenciais, de estudo, trabalho e lazer e são estruturadas por faixas etárias compreendendo bebês, crianças, adolescentes, jovens, adultos e idosos, por estado do tempo em um dia, podendo estar no período da manhã, tarde, noite e madrugada (sumarizado na tabela 2) e por estado, suscetível, infectado ou removido.

Para a modelagem computacional foram definidas três classes de agentes: o agente Timer, os agentes Compartimentais e os agentes Humanos, sendo que apenas esses últimos são modelados como sendo do tipo reativos baseados em modelos descritos na seção dois. Há um único agente Timer, três agentes Compartimentais e 4.653 agentes Humanos. Tanto o agente Timer quanto os três agentes Compartimentais atuam em uma estrutura de contêiner.

O agente Timer faz contagem dos dias. Ele também contém informação temporal que permite que todos os agentes Humanos saibam sobre a mudança dos períodos de tempo no ambiente (manhã, tarde, noite e madrugada).

Os agentes Compartimentais, mais especificamente o Agente Compartimental Suscetível, o Agente Compartimental Infectado e o Agente Compartimental Removido efetuam a contagem da quantidade de agentes Humanos que estão em cada um dos três compartimentos. Também são responsáveis por informar ao agente Timer quando cada um dos agentes Humanos concluiu as atividades de seu dia.

Os 4.653 agentes Humanos assumem três estados em um dado momento. Um estado indica sua faixa etária: bebê, criança, adolescente, jovem, adulto e idoso. Outro estado indica seu local de atuação, ou seja, em sua residência ou em atividades de trabalho, estudo ou lazer. O terceiro estado indica o estado compartimental em que se encontra: suscetível, infectado ou removido. Cada um dos agentes mantém informações sobre esses três estados internos que modelam o mundo da simulação e que contribuem para a tomada de decisão a partir de suas percepções sobre o ambiente e sobre eles mesmos.

Assim, os agentes Humanos, cientes de sua condição em termos de faixa etária (bebê, criança, adolescente, jovem, adulto e idoso), compromissos (em casa, no trabalho, estudando ou se divertindo) assumidos durante os quatro estados possíveis de um dia (manhã, tarde, noite ou madrugada) e condição de saúde (suscetível, infectado ou removido), se deslocam para um dos possíveis locais onde podem ou devem estar. Um caso típico é aquele em que um agente jovem saudável, pela manhã ou tarde está estudando ou trabalhando. De noite está estudando ou em sua residência. De madrugada, está em sua residência ou em atividades de lazer (tabela 2). Embora essa seja sua rotina, ela pode ser modificada na dinâmica do dia e esse agente pode ir/estar em outro local como, por exemplo, ter se deslocado para uma creche. Como sua presença ali é eventual, sua contribuição para o espalhamento da Influenza é nula. Se esse agente estiver em seu local de estudo ou trabalho ou lazer, sua contribuição para o espalhamento da Influenza é máxima.

A topologia do ambiente é definida por uma estrutura contendo 60 clusters. Cada cluster representa uma das 60 quadras componentes de partes de três bairros do município de Cascavel, que foram tomadas para comporem o ambiente da simulação e são ilustradas na figura 1. Cada cluster é formado por uma estrutura contendo um grafo não direcionado constituído por n nodos, sendo que essa quantidade varia em cada nodo já que representa a quantidade de locais ali existentes e sua densidade demográfica, tomando como parâmetros as informações das unidades censitárias do IBGE, do censo de 2010.

Nessa estrutura estão representados os 277 locais de estudo, trabalho e lazer e 817 locais residenciais. Cabe destacar que os nodos que representam os locais de estudo, trabalho e lazer foram posicionados nos clusters que representam as quadras em que estão situados

fisicamente em Cascavel.

Os agentes se movimentam pelos nodos apenas através das arestas que os ligam. Se as arestas ligam os diversos nodos que compõem o cluster elas são denominadas internas. As arestas que fazem as ligações entre clusters são denominadas externas. A estrutura de conexões (clusters e nodos) pode ser modificada permitindo a inclusão de rede de mundo pequeno (*small world*) através da inserção de arestas na lista de conectividade. As arestas podem estar geograficamente distantes, mas estarão logicamente conectadas, como pertencendo à estrutura de vizinhança local. A rede de mundo pequeno pode ser do tipo interna, quando arestas são inseridas localmente em um cluster, ou externa, quando arestas inseridas conectam clusters diferentes.

Para isso, seleciona-se no ambiente de simulação, um valor de até 3% [4] que informa o percentual de arestas que serão incluídas na estrutura original. Este é o caso em que, por exemplo, um agente infectado que reside no lado leste da região mapeada, tem contato direto com outro agente, que mora na região oeste e está suscetível, visto que atua naquela região.

Ainda sobre a movimentação dos agentes, se não há ligação entre um nodo e outro, o agente não pode movimentar-se entre eles. Também não pode movimentar-se para um nodo quando o mesmo estiver com sua capacidade esgotada. A capacidade do nodo é determinada no início da simulação quando é definida a quantidade máxima de agentes que cada nodo comporta. Quando a capacidade do nodo se esgota, os agentes não podem ali entrar e selecionam outro nodo para visitar. Caso não encontrem na sua adjacência um nodo com capacidade disponível, se manterão no local onde estavam.

4.1 O Simulador

A figura 2 ilustra o ambiente de simulação. Sua interface se divide em duas partes: a Tela principal e a Barra de ajustes de parâmetros. Na Tela principal é apresentado o mapa do local representado com seu respectivo grafo. Os vértices são representados com tons de cinza diferenciados para cada estado do local. A escolha pela representação ocorre da seguinte maneira. Se no local existem agentes infectados o vértice será cinza escuro. Se não existem agentes infectados e a quantidade de agentes suscetíveis é maior que a quantidade de agentes recuperados, o vértice será cinza. Se não existem agentes infectados e a quantidade de agentes recuperados é maior que a quantidade de agentes suscetíveis, então o vértice será cinza claro. Se não existir nenhum agente no vértice ele será branco.

Na Barra de ajustes de parâmetros há os seguintes conjuntos de parâmetros: Tamanho da população, Parâmetros do patógeno, Dias da simulação, Grau de conectividade da rede de mundo pequeno, Evolução dos dias, e o botão de Confirmação de parâmetros.

Na seção Tamanho da população é definida a quantidade total de agentes em cada uma

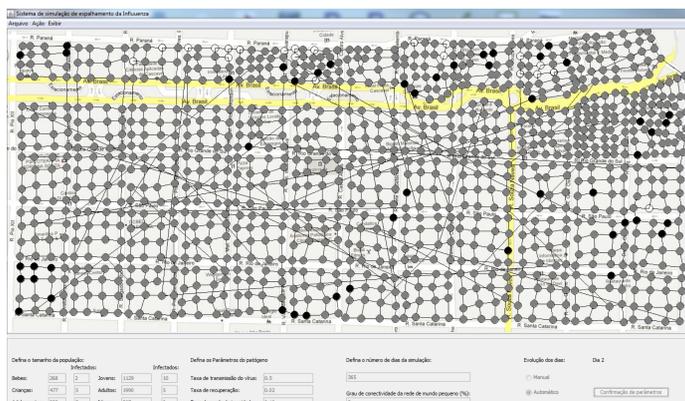


Figura 2. Tela principal do ambiente de simulação.

das faixas etárias consideradas: bebês, crianças, adolescentes, jovens, adultos e idosos, com a respectiva quantidade total de agentes infectados para cada uma dessas faixas no início da simulação.

Na seção Parâmetros do patógeno, neste caso a Influenza, são definidos três parâmetros: a taxa de transmissão do vírus; a taxa de recuperação do agente, que depende da característica da doença, e que é calculada em termos de dias de simulação; a taxa da perda de imunidade, que também depende das características da doença, e que também é calculada em termos de ciclos de tempo da simulação. Esses parâmetros foram selecionados para este experimento tendo orientação fornecida pela Vigilância Epidemiológica do município de Cascavel.

Na seção Número de dias da simulação é definida a quantidade de dias que a simulação deverá considerar. Na seção Grau de conectividade da rede de mundo pequeno, é definida a porcentagem de nodos que terão arestas incluídas. Para este experimento tomou-se 3% com inclusão de arestas internas e externas. Na seção Evolução dos dias é apresentada, sequencialmente, a quantidade de dias da simulação. O botão de Confirmação de parâmetros confirma todos os parâmetros informados.

5 Resultados e Discussões

No modelo de simulação utilizado não há nascimentos nem mortes, isto é, a população é constante, sendo conservativo o modelo. A simulação ocorre da seguinte maneira. É definido o grafo não direcionado sobre o qual será realizada a simulação e que representa os

clusters e seus nodos. Os agentes são iniciados. É feita a distribuição da população estruturada por faixa etária. A distribuição inicia alocando cada agente em uma residência. Cada agente sabe sua faixa etária e em decorrência dela, onde é seu local de residência, seu local de trabalho, estudo e de lazer. No início do primeiro dia, os agentes aguardam pela informação de que o período da manhã já se iniciou. A partir deste ponto e até o final da simulação, a execução ocorre ciclicamente, da seguinte maneira:

- O agente sorteia um vértice para visitar. Caso o vértice já esteja com sua capacidade esgotada, procurará outro vértice. Caso não encontre em sua adjacência, nenhum vértice que possa visitar ficará no local onde estava.
- O agente atualiza seu estado compartimental de acordo com a regra de transição do modelo SIRS, procedendo da seguinte maneira. Depois que ele se desloca ou não para outro ponto do grafo, levando em conta seu estado atual (susceptível, infectado ou removido) é feita a atualização para seu novo estado. Por exemplo, se o agente está em uma posição válida (a exemplo de um agente jovem em um local de trabalho no período da manhã) e se está no estado susceptível, é feita uma operação considerando o fator de probabilidade de transmissão, que é definido a partir de um produto de fatores sobre a doença, como dados biológicos, formas de contato adequado, entre outros, informado no início da simulação. Se o resultado desta operação for um valor maior que o fator de transmissão, é modificado o estado do agente, de susceptível para infectado.
- Após atualizar seu estado compartimental, o agente aguarda pela informação de que houve mudança no período de tempo no ambiente (por exemplo, de manhã para tarde) para deslocar-se novamente.
- Ao final do dia, com a passagem dos quatro períodos, o agente informa ao agente Compartimental o seu estado. O agente Compartimental incrementa seu contador da quantidade de agentes que estão no estado que representa e informa ao agente Timer que um agente terminou sua execução do dia.

Foram realizados 30 experimentos com diversas variações de parâmetros utilizando o ambiente de simulação implementado. Três são apresentados a seguir e tem por objetivo mostrar que o modelo proposto submetido ao recorte geoespacial da cidade de Cascavel, apresenta desempenho interessante do ponto de vista da compreensão dos diversos elementos necessários à realização de simulações do espalhamento da doença e das adequações que precisam ser implementadas visando retratar um cenário mais fidedigno. A tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados nos experimentos.

A figura 3 mostra o gráfico do espalhamento da Influenza entre a população de 4.653 agentes no período de 365 dias, com os parâmetros apresentados na tabela 3, Teste I. Nota-se

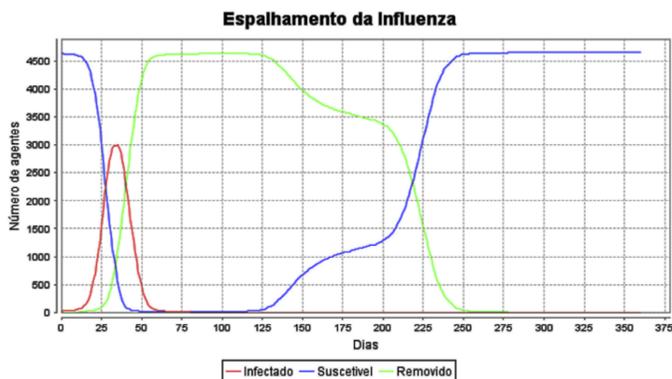


Figura 3. Espalhamento da Influenza entre a população: Teste I.

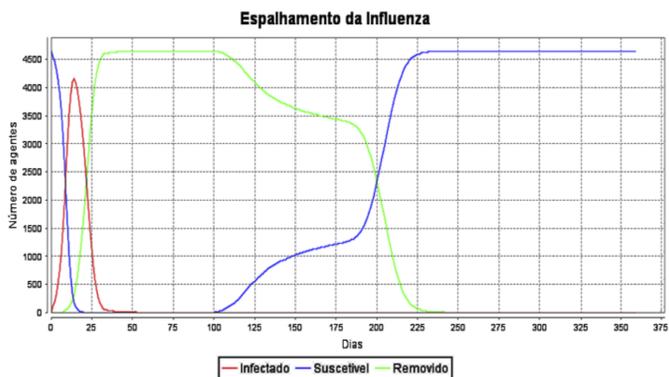


Figura 4. Espalhamento da Influenza entre a população: Teste II.

Tabela 3. Tabela indicando a quantidade total de agentes utilizados na simulação identificados por tipo.

Parâmetros	Teste I	Teste II	Teste III
Bebês infectados	0	0	2
Crianças infectados	0	0	5
Adolescentes infectados	10	0	5
Jovens infectados	5	10	10
Adultos infectados	5	5	5
Idosos infectados	0	0	0
Taxa de infecção	0,4	0,2	0,5
Taxa de recuperação	0,02	0,02	0,02
Taxa de perda de imunidade	0,25	0,25	0,10

que tendo início com 20 indivíduos infectados entre adolescentes, jovens e adultos e uma taxa de infecção de 0,4, nos primeiros 30 dias, a doença já havia atingido uma população de 3.000 agentes. Em 60 dias, a quantidade de infectados havia caído para próximo de zero, visto que a infecção não foi sustentada pelas condições intrínseca aos dados topológicos e dinâmicos empregados. Passados 250 dias da primeira infecção, a população de indivíduos já estava suscetível a uma nova infecção. Pode-se inferir que, supondo-se que a infecção ocorreu no inverno no primeiro ano, no inverno do ano seguinte uma nova infecção poderia ser esperada.

A figura 4 mostra o gráfico do espalhamento da Influenza entre a população de 4.653 agentes no período de 365 dias, com os parâmetros apresentados na tabela 3, Teste II. A figura 4 mostra que, tendo início com 15 indivíduos infectados entre adolescentes e adultos e uma taxa de infecção de 0,2, metade da força de infecção do teste I, nos primeiros 15 dias, a Influenza já havia atingido quase que a totalidade da população de agentes. Pode-se inferir que a conecto mobilidade dos agentes tem uma influência importante no espalhamento da doença e esse resultado é análogo ao observado por [8] nos experimentos realizados na China, onde as relações de contato influenciaram a propagação de uma doença de contato direto, como a simulada.

A figura 5 mostra o gráfico do espalhamento da Influenza entre a população de 4.653 agentes no período de 365 dias com os parâmetros apresentados na tabela 3, Teste III. Iniciando a simulação com 27 indivíduos infectados entre bebês, crianças, adolescentes, jovens e adultos com uma taxa de infecção de 0,5, mais que o dobro da força de infecção do teste II, pode-se notar que o ápice da infecção ocorreu no 50º dia e atinge aproximadamente 1/4 da população que se recuperou com o passar do tempo. No 225º dia havia poucos infectados.

As figuras 6, 7, 8, 9, 10 e 11 mostram a evolução temporal do espalhamento geográfico da doença. A figura 6 apresenta o estado inicial do ambiente onde foram inseridos 27 indivi-

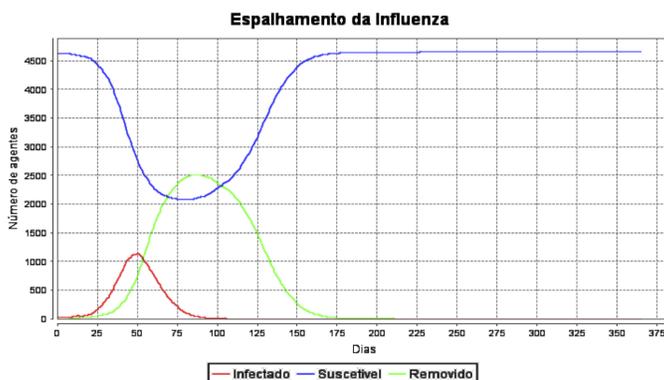


Figura 5. Espalhamento da Influenza entre a população: Teste III.

duos infectados (2 bebês, 5 crianças, 5 adolescentes, 10 jovens e 5 adultos) com a Influenza tendo 0,5 de taxa de infecção. No 25º dia da simulação, como ilustrado na figura 7 havia 138 Infectados e 45 Recuperados. O ápice da infecção ocorreu no 50º dia, ilustrado na figura 8, com 1.126 Infectados e 671 Recuperados. A partir deste dia, as infecções diminuíram e aumentou a quantidade de indivíduos Recuperados, como ilustrado na figura 9, culminando, no 100º dia, com 8 indivíduos Infectados e 2.388 Recuperados. No 175º dia, ilustrado na figura 10 havia 21 Recuperados e 4.632 Suscetíveis. No 225º dia havia 2 indivíduos Recuperados. Ao fim da simulação, toda população estava novamente suscetível, corroborando com o gráfico apresentado na figura 5.

Nas ilustrações mostradas nas figuras 6 a 11, são perceptíveis algumas ligações que atravessam vários nodos do ambiente. Tratam-se de representações para as conexões estabelecidas através da rede de mundo pequeno cujo objetivo era o de contemplar, na simulação, os relacionamentos e contatos globais dos indivíduos. No caso do teste III ilustrado, utilizou-se a taxa de 3% como sendo o grau de conectividade da rede de mundo pequeno.

6 Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram apresentados resultados obtidos a partir de um experimento computacional em que o espalhamento da Influenza em parte de três bairros da cidade de Cascavel-PR, utilizando parâmetros fictícios, foi modelado utilizando modelos compartimentais tipo SIRS, agentes reativos baseados em modelos e redes de mundo pequeno. Na modelagem procurou-se contemplar características importantes do ambiente e da doença a fim de obter resultados condizentes com o contexto real e a literatura técnica da área. Os resulta-

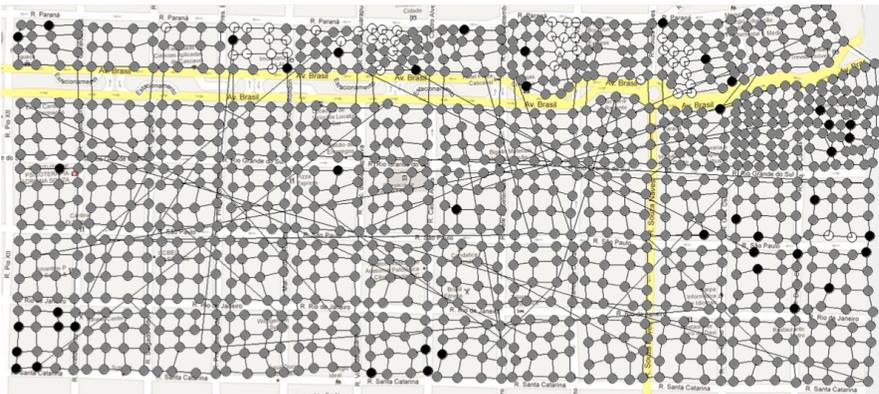


Figura 6. Espalhamento da Influenza - Início da simulação

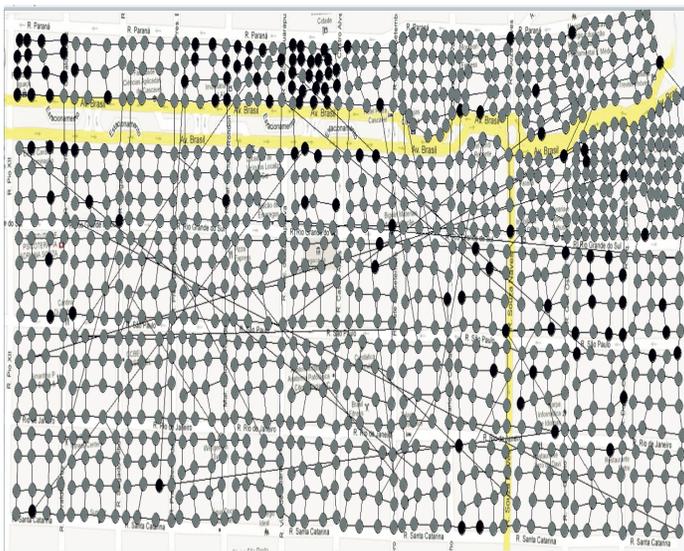


Figura 7. Espalhamento da Influenza - 25º dia

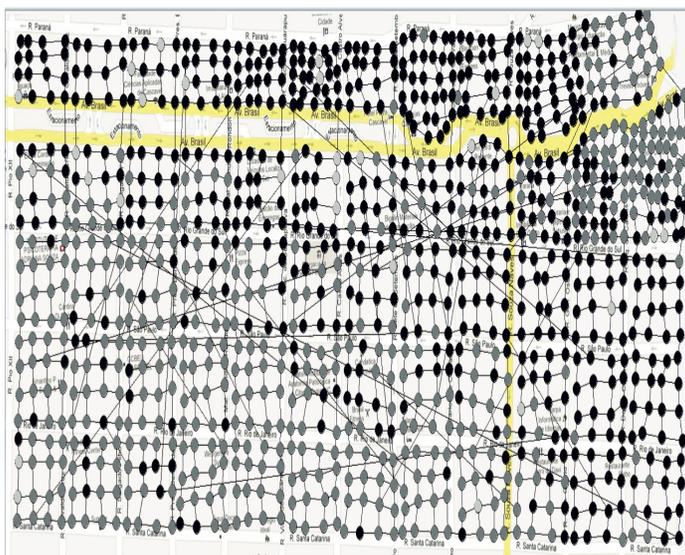


Figura 8. Espalhamento da Influenza - 50º dia

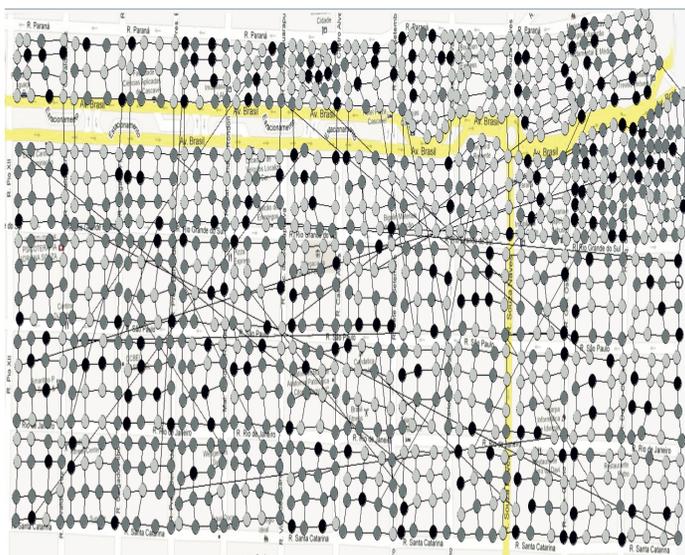


Figura 9. Espalhamento da Influenza - 100º dia

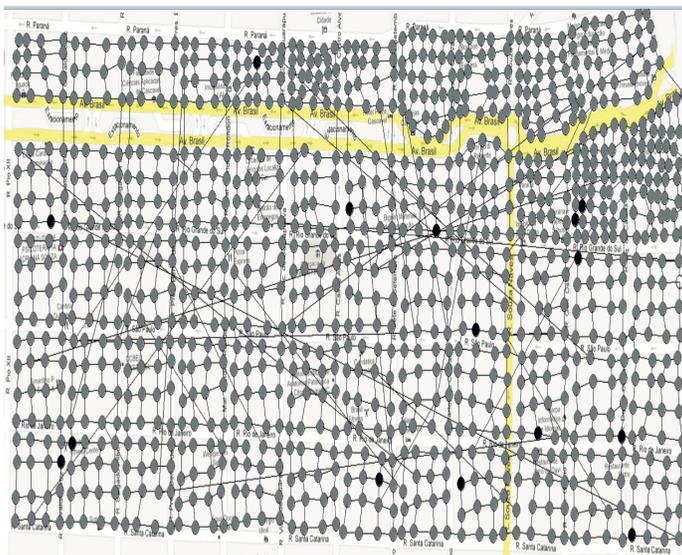


Figura 10. Espalhamento da Influenza - 175º dia

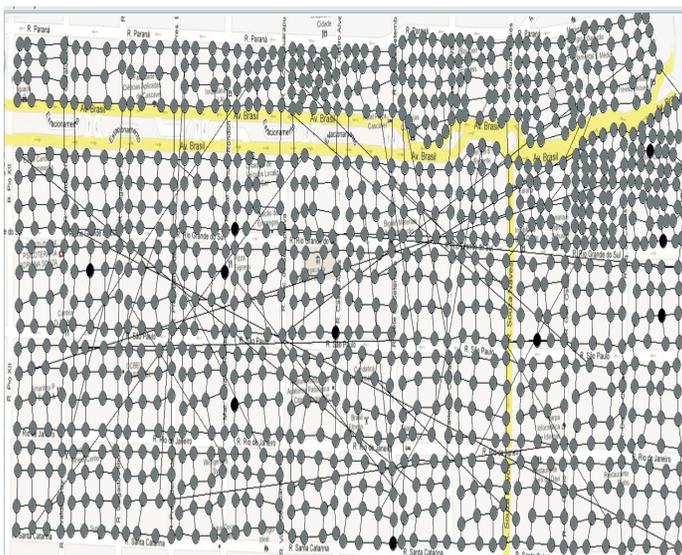


Figura 11. Espalhamento da Influenza - 225º dia

dos obtidos permitiram não apenas entender melhor a dinâmica a ser modelada como outros requisitos que precisam ser implementados visando dispor de uma ferramenta de simulação mais eficiente e robusta.

O trabalho apresentado constitui a primeira aproximação no sentido do desenvolvimento de um projeto maior que prevê uma modelagem mais adequada considerando a ambientação de toda a cidade de Cascavel. Para isso, alguns dos principais aspectos que estão sendo trabalhados tendo como elemento motivador os resultados do experimento apresentado são: a especificação de um ambiente de simulação a partir da manipulação de mapas do tipo *shape*, fornecidos pelo IBGE, decorrentes do censo 2010, que inclui unidades censitárias e separação da população por faixas; a melhoria do desempenho computacional considerando possibilidades de paralelizar o modelo, incluindo melhor exploração do potencial do uso do Jade; utilizar de forma mais adequada a técnica das redes de mundo pequeno; a melhoria de recursos de visualização de resultados e a organização dos dados da Influenza de Cascavel referentes aos anos de 2009/2011 visando a calibração e validação do modelo.

O emprego de agentes baseado em modelos se mostrou apropriado para os propósitos deste projeto e sua utilização para a próxima fase desta pesquisa tem requerido da equipe refinamentos em termos da especificação teórica da modelagem dos agentes. Um trabalho detalhado sobre este tema está em fase de preparação para publicação.

Referências

- [1] ROUQUAYROL, M. Z.; GOLDBAUM, M. Epidemiologia, história natural e prevenção de doenças. In: ROUQUAYROL, M.; FILHO, A. (Ed.). *Epidemiologia e Saúde*. Rio de Janeiro: MEDSI, 1999.
- [2] VYNNYCKY, E.; WHITE, R. G. *An Introduction to Infectious Disease Modelling*. [S.l.]: Oxford University Press, 2010.
- [3] JANSSEN, M. A. *Agent-Based Modelling*. Janeiro 2012. International Society for Ecological Economics. <http://www.ecoeco.org/>.
- [4] NEWMAN, M. Models of the small-world. *Journal of Statistical Physics*, vol.101, pp. 819-841, 2000.
- [5] BARABÁSI, A. L.; LINKED, A. L. *How everything is connected to everything else and what it means for business, science and everyday life*. New York: A Plume Book, 2003.
- [6] METZ, J. et al. *Redes Complexas: conceitos e aplicações, Relatório Técnico n. 290*. São Carlos: [s.n.], 2007. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação.

- [7] GE, Y. et al. Agent-based modeling for influenza h1n1 in an artificial classroom. *Systems Engineering Procedia* 2 94-104, 2011.
- [8] TAO, L.; XIA, L.; XIAOPING, L. Integration of small world networks with multi-agent systems for simulating epidemic spatiotemporal transmission. *Chinese Science Bulletin*. May 2010 Vol.55 n.13., 2010.
- [9] KHALIL, K. M. et al. An agent-based modeling for pandemic influenza in egypt. <http://arxiv.org/abs/1001.5275>, 2010.
- [10] CASAGRANDE, R. et al. The sirc model and influenza a. *Mathematical Biosciences* 200 (2006) 152-169, 2006.
- [11] RUSSEL, S.; NORVIG, P. *Inteligência Artificial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.
- [12] IPARDES. *Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. Caderno Estatístico Município de Cascavel*. Janeiro 2012. <Http://www.ipardes.gov.br/>.
- [13] IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sinopse do Censo Demográfico 2010 Paraná*. Maio 2011. <Http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/>.
- [14] TEIXEIRA, I. I. N. de Estudos e P. E. A. *ENADE - Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes*. 2012. <Http://enadeies.inep.gov.br/enadeResultado/>.
- [15] IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Síntese de Indicadores Sociais, Uma Análise das Condições de Vida da População Brasileira, 2010*. 2010. <Http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/>.
- [16] MDIC. 2012. <Http://www.brasilmaior.mdic.gov.br/noticias/>.
- [17] BELLIFEMINE, F. L.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. *Developing Multi-Agent System with JADE*. 2012. <Http://jade.tilab.com/>.
- [18] GILBERT, D. *The JFreeChart Class Library, Developer Guide*. 2007. <Http://www.jfree.org/jfreechart/>.