

Simulação de Evacuação Emergencial Via Autômatos Celulares: Uma Proposta de Modificação do Modelo de Schadschneider

Leandro A. Pereira

Faculdade de Matemática, UFU
38400-902, Uberlândia, MG
E-mail: leandro@famat.ufu.br

Luiz H. Duczmal

Departamento de Estatística, UFMG
31270-901, Belo Horizonte, MG
E-mail: duczmal@ufmg.br

Frederico R.B. Cruz

Departamento de Estatística, UFMG
31270-901, Belo Horizonte, MG
E-mail: fcruz@ufmg.br

***Resumo:** Este artigo apresenta uma proposta de modelo de fluxo de pessoas em evacuação emergencial baseado em simulação por autômatos celulares. Neste trabalho, estudamos o modelo inicialmente proposto por Schadschneider e a partir dele, descrevemos um novo modelo com componentes adicionais para representar a mudança de velocidade do fluxo de evacuação em função da lotação do ambiente. Utilizamos a teoria de autômatos celulares para a construção de um programa de simulação em linguagem C++, que, além de comparar o novo modelo frente ao modelo tradicional, pode simular vários ambientes, desde simples salas até construções complexas, com obstáculos fixos e móveis, além do surpreendente retorno visual. Este programa permite a reformulação total ou parcial de um ambiente a ser simulado sem a necessidade de alteração das linhas de código do programa. As simulações fornecem o tempo de evacuação total, a partir de várias simulações juntamente com o histograma da distribuição do tempo de evacuação. Uma comparação entre a distribuição empírica do tempo de evacuação total das simulações e a distribuição do valor extremo mostra que esta seria uma distribuição de probabilidades razoável para modelar o tempo de evacuação total. As principais contribuições foram: fornecer um modelo mais próximo da realidade e fornecer um programa a fim de se avaliar a configuração do ambiente com relação a rotas de fuga de emergência.*

O estudo de tráfego emergencial tem ganhado razoável importância nas últimas décadas devido à sua grande aplicabilidade. O problema de tempo de evacuação trata-se de situações em que as pessoas devem desocupar o ambiente em um menor tempo possível, devido a uma situação de emergência. O principal objetivo deste estudo é propor um novo modelo de simulação de tráfegos de pessoas em situação de emergência, sendo que este modelo é uma adaptação do modelo de Schadschneider [4]. Trabalhos como estes surgem da importância de se determinar melhores opções ou estratégias de evacuação. A localização de portas, corredores ou obstáculos podem ser decisivos, além da quantidade segura de pessoas (lotação máxima) que se deve ter em um ambiente para que se tenha um tempo de evacuação dentro de um valor esperado.

O tráfego de pessoas ocorre geralmente em ambientes (salas, corredores, escadas, etc.) onde temos uma limitação de espaço. Cada indivíduo ocupa uma determinada área nesse domínio e, portanto, a movimentação de pessoas está condicionada à existência de obstáculos, à densidade de pessoas e à localização de portas. Iremos supor que cada pessoa está contida em uma célula. Segundo Wolfram [7] a idéia destes modelos consiste em considerar cada posição (ou região) do domínio espacial como sendo uma célula, à qual é atribuído um estado. O estado de cada célula é modificado de acordo com seu estado e dos seus vizinhos na etapa de tempo anterior, através de cada série de regras que tentam imitar as leis biológicas ou físicas que regem o sistema real. A Figura 1 mostra uma célula no ambiente, sendo representada pelo quadrado central. As setas

indicam todas as possibilidades de movimentação dessa célula. Imaginamos que um ambiente possa ser totalmente repartido, de forma que cada área resultante possa conter exatamente uma única pessoa. Uma estimativa razoável para esta área seria de $\sqrt{0,2}$ metros quadrados, de acordo com os trabalhos de Cruz et al [2]. Dessa forma temos como descrever a localização da pessoa em termos de linhas e colunas (x,y). Logo podemos representar um ambiente como sendo uma matriz $n \times n$, em que cada posição dessa matriz seria um espaço físico de área $\sqrt{0,2}$ metros quadrados e que pode conter apenas uma célula. Esta matriz será chamada de matriz ambiente. A posição (x,y) dessa matriz assume valor igual a um quando tiver preenchida por uma célula e zero quando estiver vazia. Seria uma simulação de um ambiente com uma pessoa ocupando ou não uma determinada área, sob uma visão aérea. Ao mover o número um para a posição (x,y+1) é um indicativo de mudança de estado (posição) da célula, o que representa o deslocamento de uma pessoa no ambiente um passo a frente.

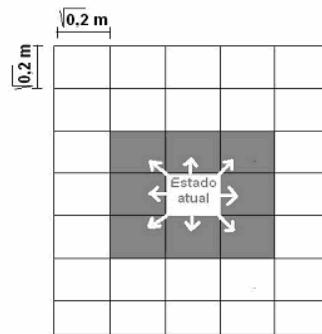


Figura 1: Representação de uma Célula e Seus Possíveis Deslocamentos.

Para fins de simulação, outra matriz se torna necessária, a matriz auxiliar. Esta matriz possui as mesmas dimensões da matriz ambiente descrita anteriormente, porém apenas guardará informações sobre o ambiente tais como localização de portas, obstáculos fixos ou móveis (como cadeiras ou mesas) e limites físicos que seriam as paredes. Um código numérico é atribuído a estes obstáculos, sendo que durante a simulação, estas informações são passadas para a célula, que obviamente não poderão ocupar aquele espaço. Esta matriz é fornecida pelo usuário do programa, através de um arquivo com extensão txt.

Para se mover pelo espaço, deve ser definida a probabilidade de cada célula se mover para uma vizinhança ou de ficar na mesma posição. Para definição das probabilidades de transição, foi utilizado um modelo matemático [4] com várias componentes, que são usados para representar a interação entre as pessoas, interação entre os obstáculos, conhecimento acerca do domínio e a velocidade condicionada ao estado de lotação do domínio. Para a interação entre as pessoas, a idéia básica é ter um rastro deixado pelas pessoas que já passaram pelo mesmo caminho. Isso funcionaria para modelar o movimento de pessoas que estão em um lugar desconhecido e que teriam que seguir as outras. Para o autômato isto seria representado pelas áreas mais visitadas, que terão uma maior probabilidade de serem escolhidas no próximo passo por uma célula que ainda não passou nesta determinada área. Isto é o que chamamos de força dinâmica, já que esta probabilidade se altera cada vez que uma célula passar pela área. Esta força dinâmica é mais evidente no início e tem uma queda constante porque supomos que, ao passar do tempo, as pessoas já terão um fluxo determinado, e não vão interagir mais dessa forma. A interação entre pessoas e os obstáculos do domínio chama-se força estática, por permanecer a mesma em toda a simulação, já que é determinada pela configuração do ambiente estudado. Essa força é maior para os caminhos que levam para áreas livres e menor para áreas próximas a paredes, obstáculos e áreas contrárias à saída [4].

A nova componente do modelo e principal contribuição deste artigo é a velocidade condicionada à lotação do ambiente, em que a velocidade da célula deve ser diminuída se as vizinhanças dois

passos à frente estão parcialmente ocupadas ou totalmente ocupadas. A velocidade poderá ser aumentada nos casos em que não temos ocupação em pelo menos dois passos à frente.

Todas essas componentes fazem parte de um modelo que tem como função determinar as probabilidades de movimentação final ou probabilidades de movimentação a posteriori de uma célula no ambiente para uma posição (x,y). A informação inicial é fornecida pela matriz de estados, ou matriz M, de dimensão 3x3 e que tem como função informar as probabilidades iniciais ou probabilidades a priori de movimentação de uma célula no ambiente para a posição (x,y). Um exemplo de matriz M está na Figura 2a. Nesta figura temos determinadas as probabilidades de movimentação da célula para cada uma das células vizinhas e a probabilidade de não movimentação, ou seja, a probabilidade de se manter na mesma posição. Os valores desta matriz são definidos pelo pesquisador, com base em informações sobre o fenômeno. As probabilidades a posteriori são calculadas segundo o modelo de Schadschneider [4], que representa uma atualização da probabilidade a priori segundo a expressão matemática:

$$P_{xy} = N \exp(k_d D_{xy}) \exp(k_s S_{xy}) M_{xy} (1 - n_{xy})^{\xi_{xy}} \quad (1)$$

em que P_{xy} representa a probabilidade a posteriori de uma célula se mover para a posição (x,y). M_{xy} representa a probabilidade a priori de uma célula se mover para a posição (x,y) obtido pela matriz M. D_{xy} é o valor numérico que representa a força do campo dinâmico para a posição (x,y). Este valor é obtido por uma matriz D de dimensão igual à matriz ambiente. Existe um contador interno para cada posição (x,y) da matriz ambiente que irá acumular pontos cada vez que essa posição for visitada por uma célula e que será armazenado na mesma posição (x,y) da matriz D. Podemos falar que quanto mais vezes a posição (x,y) for visitada, maior será a probabilidade da mesma receber a visita de uma outra célula, logo, esta matriz D guarda um peso relativo à posição (x,y) da matriz ambiente e que pode mudar a cada passo. Podemos então diminuir e aumentar a contribuição do peso D_{xy} através da constante K_d . Veja que se K_d for igual a zero, eliminamos a influência da força dinâmica no resultado do modelo. Para simulações em que a idéia do rastro é mais evidente, como em colônia de insetos, utilizamos valores de K_d altos. Porém, para simulações de tráfego de pessoas, o rastro pode existir mais fortemente para simulações de ambientes em que o conhecimento dos frequentadores acerca do mesmo não é tão alto, como em shoppings e feiras de eventos, por exemplo, em que as pessoas tendem a seguir a multidão em caso de urgência. Uma situação em que concordamos acontecer na maioria dos casos seria a diminuição do rastro com o passar do tempo. Supomos que a certo tempo, o efeito do rastro seja diminuído pelo fato de as pessoas já terem se situado no caminho certo e o fluxo de movimentação das pessoas se torna quase que independente. No modelo, uma proposta para incluir este efeito seria a diminuição da constante K_d a cada passo, de forma que K_d convirja para zero com o passar do tempo. Isto pode ser descrito pela seguinte equação:

$$k_d^{(t)} = k_d^{(t-1)} \times Q \quad (2)$$

em que representa o valor de $k_d^{(t)}$ na simulação atual e representa o valor de $k_d^{(t-1)}$ na simulação anterior, de forma que $P_{xy} \rightarrow M_{xy}$ quando $t \rightarrow \infty$. O fator Q ($0 \leq Q \leq 1$) representa a constante de decrescimento associada a K_d . Nas simulações deste trabalho, utilizamos o valor de Q igual a 0,99 para representar uma queda lenta do efeito de rastro. Este valor é arbitrário e representa uma fonte de estudos para desenvolvimento de trabalhos futuros. D_{xy} é o valor numérico que representa a força do campo estático para a posição (x,y) e que é obtido por uma matriz D, de mesma dimensão da matriz ambiente. Este valor numérico (peso) é determinado antes da simulação e permanece fixo. Geralmente são atribuídos pesos maiores para posições da matriz ambiente que se encontrem mais próximos da saída e situado em áreas mais centrais. Quanto mais próximo de obstáculos ou de paredes for a posição (x,y), menores serão os valores

de D_{xy} . A constante K_s representa a contribuição deste peso. Note que se colocarmos K_s igual a zero, eliminamos a influência desta força nos cálculos da probabilidade de movimentação a posteriori. N é uma constante normalizadora que garante que $\sum_{x,y} P_{x,y} = 1$. O termo n_{xy} representa o numero de células na posição (x,y) . Como assumimos que cada divisão poderá conter apenas uma célula, então n_{xy} só poderá assumir valores zero e um, de forma que, quando n_{xy} for igual a um, p_{xy} será igual a zero. O termo ξ_{xy} é um fator reconhecedor de obstáculos e barreiras, de forma que será igual a zero caso exista um obstáculo na posição (x,y) e igual a um caso não exista obstáculos.

Um fato importante é que a matriz M é rearranjada ao longo da simulação. Os valores numéricos da matriz serão rearranjados de acordo com a posição ocupada pela célula. Cada divisão do espaço contem um código numérico, que varia de 1 a 8, e que determina o sentido preferencial de uma célula dada a posição que ocupa no momento. Este esquema está representado na Figura 3. Estes códigos são fornecidos pelo usuário do programa antes da simulação por uma tabela no formato txt. Este processo seria a representação da visão humana no mundo artificial, já que é através da visão que designamos os sentidos preferenciais de deslocamento. A Figura 3 apresenta as setas que indicam o sentido preferencial para cada código. Note que os valores de probabilidades na matriz M “giram” conforme giramos a seta de sentidos.

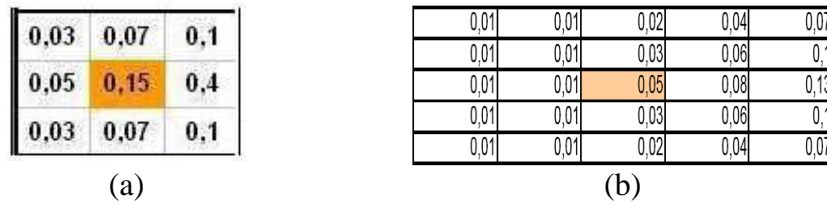


Figura 2: Exemplos de Matriz M , que Contém as Probabilidades a Priori de Movimentação de Uma Célula. (a) Matriz $M1$ (2x2) e (b) Matriz $M2$ (5x5).

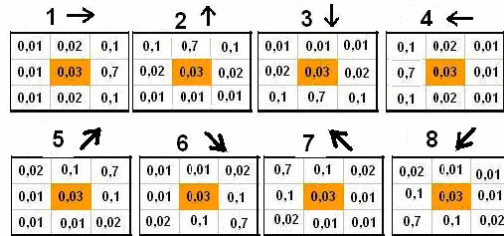


Figura 3: Configuração da Matriz M para Cada Código Obtido Pela Localização da Célula.

Note que a matriz M atribui probabilidades de movimentação somente para as células vizinhas. Se modificarmos a matriz M de forma que tenha dimensão 5x5, podemos atribuir probabilidades de movimentação para as divisões que estão a dois passos da posição atual, em qualquer sentido. Dessa forma teremos uma velocidade duas vezes maior para uma célula. Podemos chamar de $M1$ a matriz M quando temos dimensão 3x3 e de $M2$ a matriz M quando temos dimensão 5x5 (Figura 2b). A partir disso, derivamos uma nova expressão para o cálculo da probabilidade a posteriori de movimentação:

$$P_{xy} = N \exp(k_d D_{xy}) \exp(k_s S_{xy}) M1_{xy}^{V_{xy}} M2_{xy}^{(1-V_{xy})} (1 - n_{xy}) \xi_{xy} \quad (3)$$

em que $M1_{xy}$ e $M2_{xy}$ representam os valores numéricos das posições (x,y) das matrizes M1 e M2 respectivamente. O termo V_{xy} é um termo que assume apenas valores iguais a zero e um e que será responsável em dizer qual matriz será utilizada para calcular P_{xy} em uma posição qualquer (x,y). O termo V_{xy} assumirá valor igual a zero se as duas posições posteriores (no sentido definido pelo código descrito na Figura 3) estiverem desocupadas. Caso exista alguma ocupação, V_{xy} assumirá valor igual a um. Note que as matrizes M1 e M2 nunca aparecerão simultaneamente. Este procedimento sugere que a velocidade da célula irá ser aumentada caso tenha espaço para se movimentar (o que é determinado pela matriz M2) e o aparecimento de outra célula a uma distância razoavelmente pequena ocasiona em uma diminuição da velocidade.

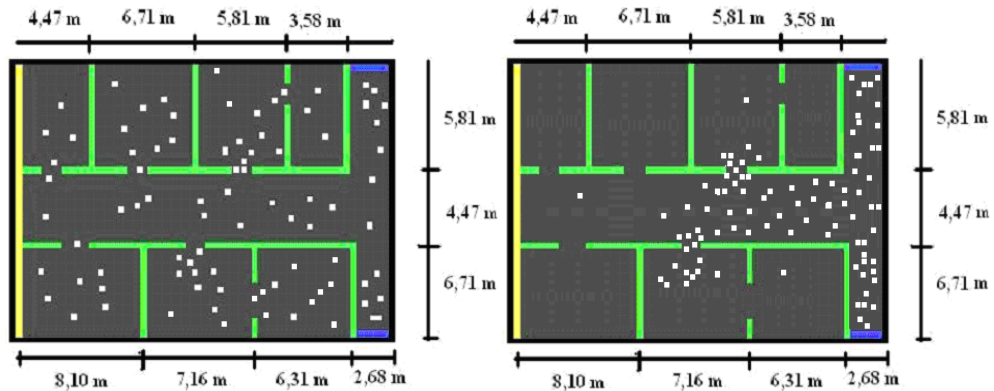


Figura 4: Foto das Simulações em Dois Momentos Diferentes: Início e Após Quase Todas as Salas Estarem Vazias.

O exemplo apresentado aqui consistiu em simular um ambiente complexo, apresentado através da Figura 4, sendo as portas identificadas pelos traços de cor azul. Este ambiente pode ser reescrito sem a necessidade de alterar os códigos do programa. A configuração do ambiente é feita pelo usuário do programa, em um procedimento realizado com a ajuda de outro software como o Microsoft Excel. A Figura 4 apresenta fotografias da simulação em dois momentos distintos (Início e Metade da simulação).

Para estudar o tempo de evacuação total, iremos estabelecer uma relação entre o tempo em minutos e o número de simulações realizadas. Sabemos que a movimentação das células segue um processo discreto no qual a movimentação é processada quadro a quadro. Cada movimento processado representa uma simulação. Segundo Tregenza [6], a velocidade média de deslocamento de uma única pessoa em um ambiente é aproximadamente 1,5 m/s. Então, para que uma pessoa se desloque em uma distância de 0,2 metros (deslocamento simples de uma divisão para outra vizinha ou deslocamento referente a uma simulação), ela demoraria cerca de 0,298 segundos. Com isso temos a Equação 4 que fornece o tempo de evacuação total. A variável “nsim” representa o numero de simulações (passos discretos) até que o ultima célula desocupe o ambiente.

$$\text{tempo de evacuação total (em minutos)} = \frac{nsim \times 0,298}{60} \quad (4)$$

As simulações foram realizadas até que todas as pessoas saíssem do ambiente e em seguida a expressão (4) forneceu a estimativa do tempo de evacuação total em minutos. A Tabela 1 mostra o resultado de 1000 simulações realizadas para os modelos (1) e (3), com 5% e 10% do espaço total ocupado por pessoas. Estes valores de densidade foram obtidos a partir de pequenos estudos sobre a lotação máxima de um ambiente em condições normais de trabalho.

		Modelo (1)	Modelo (3)	P-valor (Teste T)
Densidade 5%	Média	1,3927 min.	0,7955 min.	0,0001
	Desvio Padrão	0,0731 min.	0,0536 min.	
Densidade 10%	Média	1,6401 min.	0,9721 min.	0,0002
	Desvio Padrão	0,0914 min.	0,0546 min.	

Tabela 1: Tempo Médio de Evacuação (min) Total para o Ambiente Apresentado na Figura 5 com Lotação de 5% e 10%, a Partir dos Modelos das Equações (1) e (3).

A Tabela 1 mostra claramente o efeito da adição de novas componente no modelo, indicando que o tempo médio de evacuação é consideravelmente menor ($P < 0,05$). Este resultado mostra o possível viés de estimação desse tempo quando não levamos em consideração a mudança de velocidade. Quanto à variabilidade, vemos que ela é razoavelmente menor no caso em que utilizamos o modelo (3). Isso pode ser explicado pelo fato desse modelo conter a informação de que as pessoas que estão nas partes mais afastadas do ambiente, estão com caminho mais livre, por isso irão desenvolver uma velocidade maior ao ponto de alcançar as pessoas que estão “congestionadas” próximo às saídas do ambiente e que estão a uma velocidade menor. Este fenômeno pode ser notado claramente quando vemos a simulação em tempo real.

Outro interesse desse estudo consistiu em comparar a variável obtida nas simulações (tempo máximo de evacuação ou tempo até a última pessoa desocupar o ambiente) com uma distribuição de probabilidades em particular. A distribuição proposta foi a do valor extremo, que é utilizada para descrever as distribuições dos valores de máximo em diversas situações práticas, tais como altura de inundações, altas temperaturas, idade da pessoa mais velha falecida em uma cidade, etc. Portanto esta seria a distribuição mais adequada para o estudo de evacuação. Um bom ajuste dos dados à distribuição do valor extremo é um indicativo de que o modelo pode representar bem o fenômeno real. Uma variável aleatória que segue a distribuição do máximo valor extremo tem como f.d.p (função densidade de probabilidade) a seguinte função:

$$f(x) = \frac{1}{\theta} \exp\left(\frac{-(x-\varepsilon)}{\theta}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{-(x-\varepsilon)}{\theta}\right)\right), \quad -\infty < x < \infty \quad (5)$$

em que θ é o parâmetro de escala ($\theta > 0$) e ε é o parâmetro de locação ($-\infty < \varepsilon < \infty$). O histograma do tempo de evacuação total e uma curva ajustada segundo a distribuição do valor extremo com barras de erros estão apresentados na Figura 5, que mostra um bom ajuste dos dados ao modelo. Este gráfico consistiu de 2000 simulações, realizadas sob as mesmas condições apresentadas para a obtenção dos resultados na Tabela 1. Um teste de qualidade de ajuste de Qui-quadrado mostrou que o modelo é adequado para descrever o conjunto de dados obtido nas simulações. O EQM (Erro Quadrático Médio) do ajuste pela distribuição do valor extremo foi comparado ao EQM do ajuste por outras distribuições de probabilidades (Tabela 2). O EQM é obtido a partir da média dos desvios quadráticos entre os valores observados e esperados pela curva dos modelos teóricos. Dentre todas as distribuições apresentadas, a distribuição do valor extremo apresentou o menor valor de EQM, portanto é a distribuição que apresenta o melhor ajuste aos dados de tempo de evacuação total.

Distribuição	Erro Quadrático Médio
Gama	378,9929
Lognormal	273,1442
Weibull	656,5140
Valor extremo	183,9432

Tabela 2: Erro Quadrático Médio Obtido a Partir do Ajuste dos Dados de Tempo de Evacuação Total Para Quatro Distribuições de Probabilidades Teóricas.

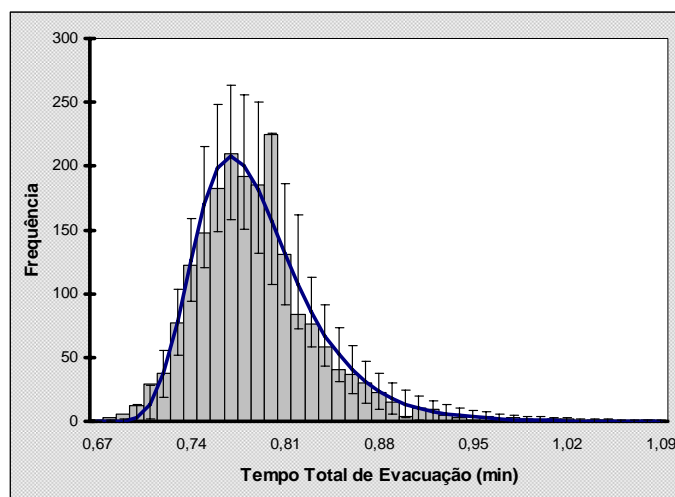


Figura 5: Curva Ajustada da Distribuição do Valor Extremo com Barras de Erros e o Conjunto de Dados do Tempo de Evacuação Total a Partir das Simulações.

Concluimos que a inclusão de novas variáveis no modelo parece ter contribuído significativamente para tornar as simulações de evacuação mais eficientes, pois o modelo apresentado, além de considerar praticamente qualquer configuração de ambiente e interações entre pessoas, agora também possui uma outra principal componente, a mudança da velocidade segundo a densidade (Lotação). O ajuste dos dados à distribuição do valor extremo indica a proximidade entre os resultados das simulações e um modelo de probabilidades utilizado para descrever situações reais semelhantes à apresentada neste trabalho. O programa elaborado pode ser utilizado para vários estudos posteriores, tais como verificar o efeito configuração do ambiente no tempo de evacuação, verificar como a densidade em conjunto com a configuração pode afetar esse tempo, verificar se uma saída de emergência está localizada no melhor ponto e qual seria a localização ideal para otimizar o tempo de evacuação.

Referências

1. Achcar, J. A.; Damasceno, V. L.; Extreme value regression models: an useful reparametrization for the survival function. *J. Appl. Stat.*, 23: pp. 59-68 (1996).
2. Cruz, F. R. B.; MacGregor Smith, J.; Medeiros, R. O.; An M/G/c/c state dependent network simulation model, *Computers & Operations Research*, 32(4): pp. 919-941 (2005).
3. Kelvin, H.L.W.; M. Luo, Computational Tool in Infrastructure Emergency Total Evacuation Analysis. *International Conference on Intelligence and Security Informatics*, 92(3): pp. 536-542 (2005).
4. Schadschneider, A. Bionics-inspired cellular automaton model for pedestrians dynamics, *Traffic and Granular Flow*, 90(3): pp. 110-114 (2001).
5. Schadschneider, A.; Burstedde, C.; Kirchner, A.; Klauck, K.; Zittartz, J.; Pedestrian and Evacuation Dynamics, ed. by M. Schreckenberg, S. D. Sharma (Springer, Berlin), pp. 87 (2002).
6. Tregenza, P. R.; *The Design of Interior Circulation*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA., 63 (1976).
7. Wolfram, S.; *Cellular Automata and Complexity*. Addison-Wesley publishing Company, N. York (1994).