

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**MARCOS PAULO DE SOUZA ZANELATTO**

**SIMULADOR DA PROPAGAÇÃO DE RESÍDUOS TÓXICOS NO SOLO BASEADO  
EM AUTÔMATOS CELULARES**

**CRICIÚMA**

**2018**

**MARCOS PAULO DE SOUZA ZANELATTO**

**SIMULADOR DA PROPAGAÇÃO DE RESÍDUOS TÓXICOS NO SOLO BASEADO  
EM AUTÔMATOS CELULARES**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado para obtenção do grau de bacharel no curso de Ciência da Computação da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientador: Prof. Esp. Sérgio Coral  
Coorientador: Dr. Estevan Grosch Tavares

**CRICIÚMA**

**2018**

**MARCOS PAULO DE SOUZA ZANELATTO**

**SIMULADOR DA PROPAGAÇÃO DE RESÍDUOS TÓXICOS NO SOLO  
BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES**

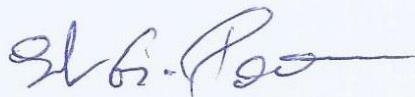
Trabalho de Conclusão de Curso aprovado  
pela Banca Examinadora para obtenção do  
Grau de Bacharel, no Curso de Ciência da  
Computação da Universidade do Extremo  
Sul Catarinense, UNESC, com Linha de  
Pesquisa em Linguagens Formais

Criciúma, 28 de novembro de 2018.

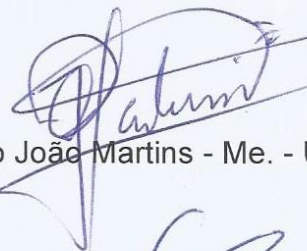
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Sérgio Coral - Esp. - UNESC - Orientador



Prof. Estevan Grosch Tavares - Dr. - UNESC - Coorientador



Prof. Paulo João Martins - Me. - UNESC



Prof. Gilberto Vieira da Silva - Esp. - UNESC

## RESUMO

Autômatos celulares vem sendo amplamente utilizados na simulação de processos físicos, químicos, biológicos ou de outras naturezas, como o alastramento de incêndios e no espalhamento de epidemias. Outra forma de aplicar autômatos celulares é simulando a propagação de fluidos em um tanque de decantação, onde camadas de solos de diferentes tipos são utilizados para conter estes fluidos. Este trabalho traz um estudo da propagação dos fluidos no solo em autômatos celulares que resulta em um protótipo desenvolvimento em HTML e JavaScript para a simulação da propagação de fluidos tóxicos no solo. O objetivo deste protótipo é sua utilização em simulações, promovendo estudos na conciliação de autômatos celulares e o meio ambiente.

**Palavras-chave:** Autômatos celulares. Prototipação. Propagação de fluidos tóxicos. Meio ambiente. Solo.

## **ABSTRACT**

Cellular automaton have been widely used in the simulation of physical, chemical, biological or other processes, such as the spread of fires or epidemics. Another way to apply cellular automaton is to simulate the propagation of fluids in a settling tank, where layers of soils of different types are used to contain these fluids. The present study brings the propagation of fluids in the soil in cellular automaton that results in a prototype development in HTML and JavaScript for the simulation of the propagation of toxic fluids in the soil. The objective of this prototype is its use in simulations, promoting studies in the conciliation of cellular automaton and the environment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de solos do Brasil .....	19
Figura 2 – Mecanismos de transporte de massa.....	23
Figura 3 – Mecanismos de dispersão ou mistura mecânica.....	25
Figura 4 – Efeitos de filtração.....	28
Figura 5 – Dimensões do autômato celular .....	30
Figura 6 – Vizinhanças de Von Neumann .....	31
Figura 7 – Vizinhanças de Moore.....	31
Figura 8 – Vizinhanças Aleatórias e arbitrárias .....	31
Figura 9 – Definição das células do autômato celular .....	36
Figura 10 – Célula principal e suas vizinhas .....	39
Figura 11 – Fluxo do autômato durante a execução do protótipo .....	39
Figura 12 – Estado inicial das células do simulador.....	40
Figura 13 – Configurações das camadas de solo .....	41
Figura 14 – Configurações de tempo para a simulação .....	42
Figura 15 – Escala de cores das células.....	43
Figura 16 – Processamento das regras dos fluídos .....	44
Figura 17 – Função que determina a cor de cada célula .....	45
Figura 18 – Paleta de cores representando os estados de cada célula .....	46
Figura 19 – Resultados da poluição em cada camada de solo .....	46

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

COMDEMA	Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente
DH	Dispersão Hidrodinâmica
ONG	Organização Não Governamental
SIR	Suscetíveis Infectados e Recuperados
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
1.3 JUSTIFICATIVA .....	11
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	12
<b>2 DEFINIÇÃO DE MEIO AMBIENTE</b> .....	<b>14</b>
2.1 CUIDADOS COM O MEIO AMBIENTE .....	14
2.2 SOLO .....	17
2.3 POLUIÇÃO .....	21
<b>2.3.1 Poluição do solo</b> .....	<b>21</b>
2.4 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES NO SOLO .....	23
<b>2.4.1 Processos físicos</b> .....	<b>24</b>
2.4.1.1 Advecção .....	24
2.4.1.2 Dispersão Mecânica .....	24
2.4.1.3 Difusão molecular .....	25
2.4.1.4 Dispersão hidrodinâmica .....	25
<b>2.4.2 Processos Bio-Físico-Químicos</b> .....	<b>26</b>
2.4.2.1 Absorção .....	26
2.4.2.2 Sorção hidrofóbica .....	26
2.4.2.3 Precipitação e Dissolução .....	26
2.4.2.4 Co-Solvência .....	27
2.4.2.5 Complexação .....	27
2.4.2.6 Ionização .....	27
2.4.2.7 Filtração .....	27
<b>3 AUTÔMATOS CELULARES</b> .....	<b>29</b>
3.1 DEFINIÇÃO .....	29
<b>3.1.1 Dimensão de um autômato celular</b> .....	<b>30</b>
<b>3.1.2 Vizinhança</b> .....	<b>30</b>
<b>3.1.3 Estados</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1.4 Regras</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1.5 Interação</b> .....	<b>32</b>
<b>4 TRABALHOS CORRELATOS</b> .....	<b>33</b>



4.1 MODELO DE AUTÔMATO CELULAR PARA DOENÇA DE CHAGAS .....	33
4.2 AUTÔMATOS CELULARES: IMPLEMENTAÇÕES DE VON NEUMANN, CONWAY E WOLFRAM.....	33
4.3 UM ESTUDO DE AUTÔMATOS CELULARES PARA O ESPALHAMENTO GEOGRÁFICO DE EPIDEMIAS COM PARÂMETRO FUZZY .....	34
4.4 TRANSIM: SIMULADOR DE TRÁFEGO URBANO, BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES.....	34
4.5 UM NOVO CONJUNTO DE REGRAS PARA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO E CRIAÇÃO DE VIAS UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES.....	35
4.6 MODELO DE AUTÔMATO CELULAR BASEADO NO ESPALHAMENTO DE FLUIDOS.....	35
<b>5 SIMULADOR DA PROPAGAÇÃO DE FLUÍDOS TÓXICOS NO SOLO .....</b>	<b>37</b>
5.1 METODOLOGIA.....	37
5.2 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS OBTIDOS.....	40
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>
<b>APÊNDICE (S).....</b>	<b>55</b>
<b>APÊNDICE A – ARTIGO .....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O surgimento da preocupação ambiental em escala global deu-se em 1972 em Estocolmo, na Suécia, com a primeira conferência mundial sobre o meio ambiente. Seu objetivo era conscientizar a sociedade em melhorar suas relações com o meio ambiente. Esta preocupação, vem chamando a atenção pela desorganização ecossistêmica que contribui para uma sociedade poluidora (ALMEIDA, 2008; BRILHANTE, 1999). Por esta razão, surgiram as leis que contribuem para o controle da poluição. Foi na declaração de Estocolmo que a criação destas leis foram recomendadas e adotadas por duas cidades brasileiras, Rio de Janeiro em 1975 e São Paulo 1976 (SÁNCHEZ, 2006).

Em 1991, o programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente classificou o impacto das ações humanas que prejudicam o Ambiente. Esta classificação possui 5 grandes categorias. Uma desta categoria descreve o acúmulo dos restos urbanos e industriais, a acidificação por conta dos poluentes transportados pelo ar, o derramamento de óleo, o uso excessivo de pesticidas e adubos, entre outros (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2005; OLDEMAN; HAKKELING; SOMBROEK, 1991, tradução nossa).

A recuperação de áreas que sofreram com a contaminação, requer um estudo aprofundado sobre os tópicos relacionados a esta área, por conta desta dificuldade enfrentada, seria muito mais simples evitar a contaminação de uma área, ao invés de recuperá-la (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

O primeiro conceito de autômatos celulares foi realizado por John Von Neumann, seu objetivo era criar uma simulação dos processos naturais e artificiais. O autômato celular tem como base as simulações discretas de espaço e tempo, buscando simplificar a representação de modelos complexos como a auto reprodução (ERMENTROUT; EDELSTEIN-KESHET, 1993). Os modelos de autômatos celulares implementados são constituídos por uma malha, onde as células ficam dispostas, os estados que determinam a forma da célula naquele intervalo de tempo e as regras, responsáveis por em cada interação, determinar um novo estado para as células.

Por tais evidências, o trabalho aqui proposto, busca um estudo sobre a aplicação de autômatos celulares na poluição de solos através de fluidos tóxicos, além

de uma simulação representando a contaminação de uma área e como os fluidos se alastram através do solo.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Simular a propagação de fluido tóxico no solo, com o uso de autômatos celulares.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos para a realização deste trabalho consistem em:

- a) caracterizar os tipos de solo e como os fluidos se propagam neles;
- b) conhecer a teoria de autômatos celulares;
- c) empregar as formas de aplicação de autômatos celulares;
- d) demonstrar o funcionamento de um autômato celular por meio de uma simulação de propagação de fluidos tóxicos.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Pelo fato de que os autômatos celulares são capazes de resolver problemas complexos com implementações simples, ao longo do tempo estes vêm ganhando um espaço cada vez maior na busca de modelar os conceitos da vida real.

John Von Neumann foi o pioneiro na conceituação de autômatos celulares. Seu objetivo era levar a teoria dos autômatos para a biologia, seu principal estudo estava focado na auto-reprodução (AGUIAR; COSTA, 2001). Uma variação do conceito inicial criado por Von Neumann foi criada por Stephen Wolfram que acrescentou modelos matemáticos simples de sistemas naturais, impondo a cada célula de um autômato, um valor finito. Tais valores vão evoluindo com o decorrer do tempo em função das regras impostas a eles e os valores das células vizinhas (CASTRO; CASTRO, 2008).

O cuidado a se tomar com o solo se destaca pela sua importância em relação ao meio. Sua capacidade de armazenar nutrientes, reter água e dar suporte as plantas são suas principais funções em relação a agricultura. Contudo, seus

recursos não são renováveis e precisam de reposição após a absorção das plantas. Tal reposição pode ser realizada através de adubação por exemplo. A qualidade do solo para o desenvolvimento agrícola está associada ao percentual dos componentes presentes. O alumínio por sua vez em percentual mais elevado limita a absorção dos nutrientes pelas plantas além de serem tóxicos. O solo também pode se comportar como filtro, impedindo que contaminantes presentes juntos à água, cheguem a lençóis freáticos, prejudicando um grande volume de água. Outra importância presente no solo é sua capacidade de regular o nível da água dos rios. Em períodos chuvosos, o excesso de água é parcialmente absorvido pelo solo que retém a água temporariamente evitando enchentes e alagamentos (IBGE, 2015; LEPSCH, 2002).

Com base na abstração da aplicação de autômatos celulares em diversas áreas e também sua facilidade na implementação e representação de sistemas complexos, este trabalho teve como propósito representar e aplicar a teoria dos autômatos celulares na representação de como os fluídos tóxicos se alastram no solo, através de uma simulação de sua propagação.

O desenvolvimento do simulador busca determinar aproximadamente a área afetada por fluido tóxico no solo, mostrando a importância do cuidado a se ter e a possibilidade de ser delimitado o local para tratamento e recuperação do solo afetado.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por seis capítulos, sendo o primeiro a introdução, objetivo geral, objetivos específicos, justificativa e a estrutura do trabalho.

O capítulo dois relata a definição do meio ambiente, os cuidados que são realizados através programas de combate a degradação ou poluição do meio ambiente, aborda também o solo e suas características e por fim, a poluição tanto o conceito geral, quanto a poluição no solo, além do transporte de contaminantes no solo, os processos que envolve a contaminação de um solo por um fluído.

No capítulo três é abordado os autômatos celulares, sua definição, como são organizados, além dos conceitos de dimensão, vizinhança, estados e regras que os compõe.

O quarto capítulo aborda os trabalhos correlatos, os quais foram utilizados como referência durante o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo cinco foi abordada a implementação do protótipo, a metodologia utilizada para o desenvolvimento e os resultados que foram obtidos.

O capítulo seis contempla a conclusão do trabalho, as considerações finais e dificuldades encontradas durante a implementação, além das sugestões de trabalhos futuros.

## 2 DEFINIÇÃO DE MEIO AMBIENTE

Existem diversas definições para o termo meio ambiente, por ser um conceito amplo abrangendo tanto a natureza quanto a sociedade, de características variadas uma vez que pode ser compreendida em diversos panoramas e maleável em razão de ter a capacidade de englobar apenas a necessidade dos interessados (BRILHANTE, 1999; SÁNCHEZ, 2006).

Diferentes países definem através de suas leis o conceito de Meio Ambiente, a forma com que estes são transcritos, apresentam similaridades e diferenças na forma de estabelecer seu espaço de aplicação. De acordo com a legislação brasileira o meio ambiente é visto como um conjunto de condições e interações seja ela química, física ou biológica que permite e abriga a vida em suas formas (BRASIL, 1981; SÁNCHEZ, 2006).

Para Coimbra (2002) tudo o que envolve um ser, é considerado parte do meio ambiente, seja o solo pelo qual os seres vivos pisam, o ar pelo qual é possível respirar, a água, as plantas, os animais, tudo fazendo parte de um todo e por fim, a interação ecossistêmica, que nada mais é do que a forma pela qual os seres reagem e exercem funções uns com os outros.

### 2.1 CUIDADOS COM O MEIO AMBIENTE

A humanidade extrai os recursos primordiais à sobrevivência e ao desenvolvimento socioeconômico do meio ambiente. Esses recursos ambientais nos fornecem o suporte necessário para a vida. Porém, a degradação ambiental modifica o meio ambiente, levando a escassez do fornecimento desses recursos indispensáveis ao homem e limitando o ambiente para as funções ecológicas de todos seres vivos. Sendo assim, é de entendimento mundial que existe a necessidade de reorganizar as atividades humanas, de maneira que os impactos ambientais promovidos pelo homem não prejudiquem o ambiente, pretendendo conservar essa fonte limitada e esgotável de vida e recursos. Esse entendimento da necessidade de preservar o ambiente guiou os países a aderirem políticas e legislações segundo suas realidades econômicas, sociais e culturais (CUNHA et al., 2013; SÁNCHEZ, 2006).

A Declaração sobre o Meio Ambiente Humano se deu através da Conferência de Stockholm, que aconteceu em junho de 1972. A mesma possui 23 princípios que estabelecem uma visão mundial, com o intuito de servir de guia à humanidade, para assim preservar e melhorar o meio ambiente. Os ideais de direito ambiental se originaram logo após a Declaração de Stockholm sobre Meio Ambiente. Com princípios que declaravam prudência, responsabilidade, poluidor-pagador e cooperação entre estados (CUNHA et al., 2013; LEAL, 2004).

No decorrer dos anos, a sociedade trouxe consigo mudanças sociais que implicam amplamente para a relação entre meio ambiente e segurança, visto que acontecem conflitos por recursos ao mesmo tempo em que a necessidade por segurança ambiental. Isto é, a relação entre homem e meio ambiente torna-se uma questão no qual se deve levar em conta que para ambos a abordagem dominante é a prevenção. Em consequência disso, sucedeu-se a declaração do Rio de Janeiro que proclamou que em situações nas quais há perdas ambientais irreversíveis, a incerteza científica não deverá ser usada como motivo para menosprezar medidas que precatem a degradação do meio ambiente (BARROS-PLATIAU; VARELLA; SCHLEICHER, 2004; CUNHA et al., 2013; DECLARAÇÃO DO RIO DE JANEIRO, 1992).

A eco-92, também conhecida como Rio-92 aconteceu na cidade do Rio de Janeiro em 1992, sendo uma conferência das Nações Unidas que abordou a temática meio ambiente e desenvolvimento, influenciando de maneira significativa as conferências internacionais. O evento foi contemplado com o comparecimento de representantes de mais de 170 países que participavam das Nações Unidas, no qual foram apontadas propostas fortemente fundamentadas de como alcançar a sustentabilidade social. Tais propostas levaram a elaboração de um programa de ações a serem adotadas mundialmente, em busca do desenvolvimento sustentável. Este programa ficou conhecido como Agenda 21<sup>1</sup>, tratando-se de um planejamento para o futuro com ações de curto, médio e longo prazo (BRASIL, 2017; LEAL, 2004; OLIVEIRA, 2012).

---

<sup>1</sup> Documento extraído da Rio-92, no qual estabeleceu parceria entre o governo e a sociedade, com o intuito de atingir o desenvolvimento sustentável no século XXI

No Brasil a construção da Agenda 21 iniciou no ano de 1996, alguns anos após a proposta do programa ter sido realizada. Levou-se aproximadamente 6 anos para que a composição da Agenda 21 brasileira fosse finalizada, sendo assim concluída em 2002. Para a sua realização se obteve a contribuição de aproximadamente 40 mil pessoas de todo o Brasil (BRASIL, 2017).

Após essa conferência das Nações Unidas, se estabeleceu a concepção de desenvolvimento sustentável como sendo um instrumento de ação relevante de vários elementos sociais, dos estados, de empresas de diversos portes, de ativistas participantes de ONGs, de programas de pós-graduação, entre outros (OLIVEIRA, 2012).

O grande impacto da Rio-92 levou suas edições seguintes a receberem nomes como: “Rio +5” no qual foi realizado na cidade do Rio de Janeiro do dia 13 a 19 de março de 1997. A outra chamou-se de “Rio +10” ocorrendo no período de 26 de agosto à 4 de setembro de 2002 na África do Sul, abordando Desenvolvimento Sustentável e teve ainda a “Rio +20” sucedendo-se novamente na cidade do Rio de Janeiro dos dias 13 a 22 de junho de 2012. Na conferência do Rio+20, os países reafirmaram seu comprometimento com o desenvolvimento sustentável (CUNHA et al., 2013; OLIVEIRA, 2012).

Através de um evento em 1995 patrocinado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente, o estado de Santa Catarina teve a possibilidade de acesso ao documento que esclarecia sobre a Agenda 21. Logo, em 1997, iniciou-se o trabalho de implementação local de adequação as normas referentes ao documento nas prefeituras das cidades de Joinville, Florianópolis, Blumenau, Jaraguá do Sul e Laguna (LEAL, 2004).

A implantação da Agenda 21 Catarinense começou em junho de 2000, por meio de um protocolo assinado pelo Governo do Estado. Em seguida em dezembro de 2001, lançou-se o projeto de elaboração da Agenda 21 Catarinense, no qual contou com a cooperação de mais de 250 representantes da sociedade organizada e com uma Comissão Executiva formada por 34 instituições (LEAL, 2004).

Em Criciúma, no ano de 1979 foi criada a lei municipal Nº 1484, que contemplou a criação do Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente (COMDEMA), órgão responsável por prestar assessoria a Prefeitura Municipal de Criciúma no que diz respeito ao equilíbrio ecológico e combate à poluição. Em sua



criação, o COMDEMA era composto por nove membros escolhidos pelo Prefeito, com mandato de dois anos. O Conselho, portanto, possuía a responsabilidade de constatar a poluição de uma área e notificar o responsável sobre o assunto. Além de adverti-lo de possíveis consequências conforme leis federais e estaduais.

A lei também impunha a proibição do lançamento de resíduos em qualquer estado de matéria ou forma de energia, gerado pela ação humana, na água ou no solo que contaminem o meio ambiente.

Em 13 de dezembro de 2002, a lei Nº 4440 regulamentou o COMDEMA, passando a ser representado por 16 membros, sendo estes do setor público e da sociedade civil organizada.

O Conselho atualmente possui a responsabilidade de fornecer esclarecimentos a respeito da defesa do meio ambiente, à indústria, comércio, agropecuária e a comunidade, além de colaborar com campanhas para a educação relacionada aos problemas de saneamento básico, poluições, combate a pragas e proteção da fauna e da flora (CRICIÚMA, 2011).

## 2.2 SOLO

O solo é uma coleção de corpos naturais, é um material resultante da decomposição das rochas pela atuação de fatores físicos ou químicos, composto por partes sólidas, líquidas e gasosas. Sua formação é constituída por materiais orgânicos e minerais, que abrange a maior parte da superfície terrestre (EMBRAPA, 2002; EMBRAPA, 2006).

O território brasileiro possui uma ampla diversidade de tipos de solos, por conta das interações das diversas formas e tipos de clima, relevo, vegetação, material de origem e organismos associados encontrados no país. Esta diversidade deve-se a natureza do Brasil, suas potencialidades, formas de ocupação, uso e desenvolvimento das terras (EMBRAPA, 2002).

Além da grande diversidade dos tipos de solo, o Brasil apresenta uma variedade de ecossistemas no seu território. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), pode-se diferenciar 13 grandes classes de solos no país conforme mostra a tabela 1. Estas classes subdividem-se em variados tipos de solo de acordo com as suas características próprias, sendo assim separados

em unidades mais homogêneas. No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), encontram-se detalhadamente as definições, conceitos e critérios aplicados nas classificações, além da diferenciação dos diversos tipos de solos no Brasil (EMBRAPA, 2002).

Tabela 1 - Extensão e distribuição dos solos no Brasil

Tipos de Solos	Brasil		Relativa por Regiões				
	Absoluta (km <sup>2</sup> )	Relativa ao total	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Alissolos	371.874,48	4,36	8,67	0,00	0,00	0,00	6,34
Argissolos	1.713.853,49	19,98	24,40	17,20	13,77	20,68	14,77
Cambissolos	232.139,19	2,73	1,06	2,09	1,59	8,64	9,28
Chernossolos	42.363,93	0,53	0,00	1,05	0,27	0,21	3,94
Espodossolo	133.204,88	1,58	3,12	0,39	0,26	0,37	0,00
Gleissolos	311445,26	3,66	6,41	0,78	2,85	0,50	0,40
Latossolos	3.317.590,34	38,73	33,86	31,01	52,81	56,30	24,96
Luvissolos	225.594,90	2,65	2,75	7,60	0,00	0,00	0,00
Neossolos	1.246.898,89	14,57	8,49	27,55	16,36	9,38	23,23
Nitossolos	119.731,33	1,41	0,28	0,05	1,22	2,56	11,48
Planossolos	155.152,13	1,84	0,16	6,61	1,73	0,16	3,00
Plintossolos	508.539,37	5,95	7,60	4,68	8,78	0,00	0,00
Vertissolos	169.015,27	2,01	3,20	0,99	0,36	1,20	2,60
Água	160.532,30	1,88	3,20	0,36	0,31	1,20	2,60
Total	8.547.403,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Embrapa (2002).

De acordo com a Embrapa (2002), entre os tipos de solos encontrados no território brasileiro, os de maior abrangência são os latossolos, os argissolos e os neossolos, conforme ilustra a figura 1 do mapa de solos do Brasil.

Figura 1 – Mapa de solos do Brasil



Fonte: Manzatto, Freitas Junior e Peres (2002).

Os latossolos são compostos por uma fração argila e uma fração areia. Suas texturas são variáveis, contendo uma quantidade regular ou excessiva de argila, geralmente muito profundas, porosas, macias e permeáveis, apresentando baixa fertilidade natural. Esse tipo de solo abrange 38,7% do território total do Brasil e encontra-se em toda a ocupação nacional, além de ser considerado o mais representativo do país. Há uma variedade de latossolos, que se diferem pela sua cor, fertilidade natural, teor de óxidos de ferro e textura (EMBRAPA, 2002).

Os argissolos quando comparados aos latossolos, ocupam áreas de relevos mais dissecados. Esse tipo de solo forma uma classe bem heterogênea, possuindo em comum um crescimento substancial na quantidade de argila em profundidade. Apresentam uma profundidade variável, bem estruturados e prevalecendo cores avermelhadas ou amareladas, com uma textura que varia de arenosa a argilosa nos horizontes superficiais e de média a bastante argilosa nos subsuperficiais, tendo sua fertilidade variada. Os argissolos englobam 19,98% da superfície do Brasil, perdendo apenas para os latossolos em questões de extensão geográfica. Semelhantemente aos latossolos, os argissolos espalham-se em praticamente todas regiões brasileiras (EMBRAPA, 2002).

Os neossolos distinguem-se na maioria das vezes pelo seu material de origem e paisagem. Ocupam 14,57% do território brasileiro, podem ser divididos em quatro tipos, apresentando características distintas (EMBRAPA, 2002).

- a) neossolos litólicos possuem uma espessura abaixo de 50cm e solos rasos, além de uma fina camada de material terroso acima da rocha.
- b) neossolos regolíticos possuem uma estrutura mais aprofundada, com uma espessura acima de 50cm e contendo minerais alteráveis ou pedaços de rocha.
- c) neossolos quartzarênicos são solos mais profundos, sua textura é arenosa, além disso, possuem uma ausência grande de minerais primários alteráveis.
- d) neossolos flúvicos são originários de sedimentos aluviais e sua superfície é mais escura.

Por se tratar também de um recurso natural, o solo se esgota principalmente se passar por fortes explorações sem a preocupação de tomar ações que o conservem ou que o recuperem de tais perdas de recursos (ALMEIDA, 2008).

Tais explorações, realizadas pelas atividades humanas, não possuem preocupação com a recuperação do solo utilizado, de forma a mantê-lo para as gerações futuras (RAVEN; BERG, 2004).

## 2.3 POLUIÇÃO

Atualmente, o tema poluição tem despertado a atenção e a preocupação nos especialistas, nas autoridades e na sociedade. Poluir significa sujar a natureza, ou seja, uma situação nociva entorno dos seres vivos. Esta situação é recorrente das atividades humanas causadoras da poluição. Deste modo, estas atividades devem ser monitoradas, a fim de impedir ou amenizar a poluição (GÜNTER, 2005; SANCHÉZ, 2006).

Qualquer variação da composição e das características que acabem causando impactos nos ecossistemas é determinada poluição, ou como uma intervenção prejudicial dos processos de transferência de energia (BRILHANTE, 1999).

A poluição ter se tornado algo intolerável pela sociedade, ampliou a preocupação de seus impactos sobre o meio ambiente (MESQUITA, 2004), as leis ambientais surgiram, com o objetivo de controlar a poluição, em busca da prevenção dos impactos ambientais. A declaração de Stockholm, recomendou a todos os governos a criação destas leis, na qual foram estabelecidas no Brasil, em 1975 na cidade do Rio de Janeiro e em 1976 em São Paulo (SANCHÉZ, 2006). Para realizar o controle da poluição, segundo a legislação ambiental, determinam-se medidas e parâmetros de qualidade do ar, da água e do solo, que se pretende obedecer num determinado ambiente (BRAGA et al., 2002).

### 2.3.1 Poluição do solo

O crescimento da urbanização das sociedades modernas proporciona uma divisão do espaço rural e faz com que se perca a noção da importância do solo como auxiliador da vida no planeta. As alterações indesejáveis das características do solo podem afetar negativamente o planeta, assim denominada de poluição do solo (ODUM, 1997; VARENNES, 2003).

A poluição do solo pode ser definida como toda variação provocada em suas características pela ação de produtos químicos ou de resíduos líquidos ou sólidos que prejudicam a utilização do solo ou o transforme em prejudicial ao homem e outros seres vivos. Apenas no fim da década de 70, tornou-se perceptível as preocupações com solos contaminados (MESQUITA, 2004). Os poluentes no solo podem causar estragos catastróficos, podendo prejudicar os seres vivos e o ecossistema. Mesmo aplicando estratégias de remediação de solos, é impossível reverter todos os prejuízos gerados ao meio ambiente (EDWARDS, 2002).

O solo exerce diversas funções vitais, sendo essas ambientais, ecológicas, sociais e econômicas. Por essa razão se reconhece internacionalmente a necessidade da proteção do solo e a limitação dos processos de degradação do mesmo (CASTRO; DUARTE; SANTOS, 2003).

Geralmente as atividades humanas ocasionam ou agravam problemas no solo. Essas atividades não proporcionam o uso sustentável do solo, ou seja, não há a preocupação com a sua preservação de forma que possibilite as gerações futuras de usufruir esse recurso, visto que a utilização do mesmo de uma maneira sustentável capacitará a renovação ano após ano por meio dos processos naturais. Por tradição, tem-se utilizado o solo como depósito de matérias decorrentes das atividades humanas, principalmente para abandono final. No entanto, a preocupação com a proteção, preservação, controle e recuperação do solo tem crescido nos últimos 30 anos na medida que aumenta as áreas contaminadas. (GÜNTER, 2005; RAVEN; BERG, 2004).

Na atualidade, não há como afirmar que existam solos completamente sem contaminação, condutas de cultivo, poluição produzida pelo homem e deposição aérea dos contaminantes naturais, interferem nos níveis de poluição dos solos. Até mesmo solos em que aparentemente não houve danos pelas atividades do ser humano, podem conter níveis de elementos alteradores. Níveis de elementos inorgânicos, como os metais pesados, variam amplamente de território a território (PETTS; EDULJEE, 1994).

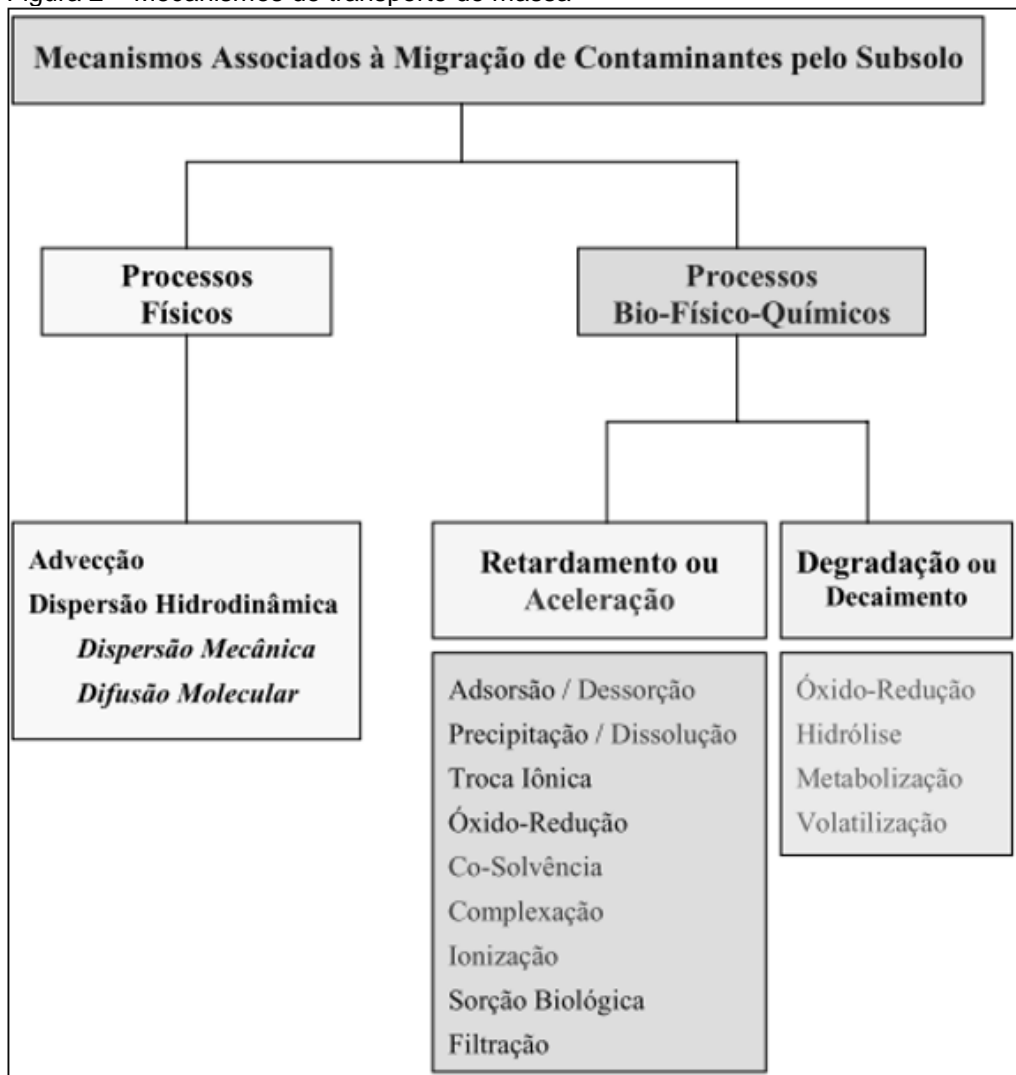
Segundo Castro, Duarte e Santos (2003), os contaminantes do solo podem resultar em perdas significativas das diversas funções do solo, além de poder provocar a contaminação da água subterrânea. A decorrência desses contaminantes se origina de variadas formas, e quando acima de determinados níveis pode provocar diversos

impactos negativos para a cadeia alimentar, para a saúde pública, para os múltiplos ecossistemas e recursos naturais.

## 2.4 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES NO SOLO

O transporte de um contaminante no solo varia de acordo com a origem do contaminante e do tipo de solo. As diferentes propriedades químicas de um fluido têm grande importância na forma com que os compostos químicos reagem ao solo. O processo de transporte destes fluidos no solo depende de processos físicos, químicos e biológicos, conforme a figura 2.

Figura 2 – Mecanismos de transporte de massa



Fonte: Moncada (2004).

Os processos são divididos em físicos e Bio-Físico-Químicos, onde os processos físicos envolvem a advecção e a dispersão hidrodinâmica (DH) que envolve a dispersão tanto mecânica quanto molecular e o processo Bio-Físico-Químicos envolvem diversos processos que alteram a forma com que um contaminante se propaga.

### 2.4.1 Processos físicos

Os processos físicos são definidos por processos que tem uma relação direta entre o fluido e o meio físico (solo) ao qual está entrando em contato.

#### 2.4.1.1 Advecção

Entende-se por advecção o processo de carregar o contaminante através do fluxo da água no solo. Segundo Moncada (2004) a velocidade com que o contaminante se desloca é a mesma velocidade da água. A equação que nos permite identificar a velocidade de percolação, ou seja, a velocidade com que o fluido passa através do solo, é definida por:

$$V = k \times \frac{i}{n}, \quad (1)$$

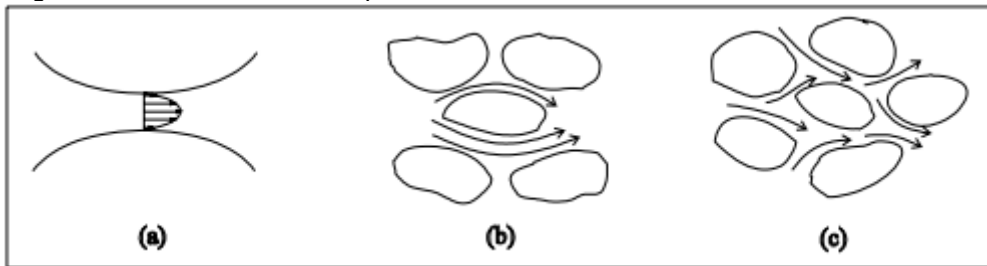
onde,  $k$  = condutividade hidráulica,  $i$  = gradiente hidráulico e  $n$  = porosidade efetiva do meio.

#### 2.4.1.2 Dispersão Mecânica

A dispersão representa o fluxo do fluido em um meio poroso. Existem três mecanismos básicos da dispersão mecânica, conforme ilustra a figura 3. O primeiro mecanismo se dá pelo fato das moléculas do fluido estarem mais próximas dos grãos do solo e acabarem se movendo de maneira mais lenta em comparação com as que passam sem tocar em determinados grãos. O segundo mecanismo leva em consideração o tamanho dos grãos durante o transporte, e o terceiro leva em consideração a tortuosidade dos grãos (BEAR, 1972).



Figura 3 – Mecanismos de dispersão ou mistura mecânica



Fonte: Moncada (2004).

Na figura 3 tem-se (a) os mecanismos de dispersão ou mistura mecânica, (b) a dispersão em canais individuais e (c) a tortuosidade, reentrâncias e interligações.

São consideradas duas direções para a dispersão do fluido em um meio poroso, a dispersão na direção do fluxo da solução é chamada de dispersão longitudinal, já a dispersão na direção perpendicular ao fluxo, pode ser chamada de dispersão transversal (MONCADA, 2004).

#### 2.4.1.3 Difusão molecular

Moncada (2004) cita que a primeira lei de Fick expõe que um soluto, substância que será dissolvida em outra substância, difunde-se proporcionalmente ao seu gradiente de concentração, isso significa que a difusão molecular acontece quando um soluto dissolvido em água se desloca de uma área a outra. Contudo, onde concentração varia de acordo com o passar do tempo, deve-se aplicar a segunda lei de Fick.

#### 2.4.1.4 Dispersão hidrodinâmica

Segundo Moncada (2004), na abordagem sobre fluxo em meios porosos, não há como separar o processo de Difusão Molecular com o de Dispersão Mecânica. Existe a combinação dos dois processos para assim determinar o coeficiente de DH.

## **2.4.2 Processos Bio-Físico-Químicos**

O nome Bio-Físico-Químico se dá pelo fato de que estes processos são de difícil separação em ordem biológica, física ou química. Tais processos retardam ou aceleram o transporte de fluidos através de águas subterrâneas.

### **2.4.2.1 Absorção**

A superfície do solo possui forças que atraem e prendem determinados compostos, estas forças são derivadas de desnivelamento ou determinadas modificações nas estruturas moleculares dos solos. Com isso, os fluidos que entram em contato com tais superfícies são atraídos e se prendem as estruturas, formando o processo de absorção (LAGREGA; BUCKINGHAM; EVANS, 2010).

### **2.4.2.2 Sorção hidrofóbica**

A sorção hidrofóbica é um processo que mantém substâncias orgânicas do solo. O material orgânico encontrado no solo atua como um solubilizante para as substâncias que são dissolvidas em água. Pelo fato de que os compostos orgânicos apresentam uma maior afinidade com os solventes orgânicos, ocorre a passagem da fase aquosa para a fase orgânica. Conforme menor for a polaridade do composto, maior será a sua predisposição de ser repartido na fase orgânica, também conhecida como fase hidrofóbica (MONCADA, 2004; LAGREGA; BUCKINGHAM; EVANS, 2010).

### **2.4.2.3 Precipitação e Dissolução**

A precipitação ocorre quando uma substância ultrapassa seu grau de solubilidade em relação a solução, forçando com que a partir desse limite a sobra precipite da solução. A partir do momento em que o grau de solubilidade retorna a valores inferiores ao limite, ocorre a dissolução desta precipitação, como um processo contrário (MONCADA, 2002).

#### 2.4.2.4 Co-Solvência

O solvente, substância que dissolve um soluto em seu interior, pode facilitar muito a forma com que uma substância é transportada pelo solo. A Co-Solvência é a adição de mais de um solvente que faz com que a solubilidade de uma substância aumente, tornando-a assim mais móvel em relação ao solo (MONCADA, 2002).

#### 2.4.2.5 Complexação

A complexação é um processo de formação de complexos, que nada mais é do que a ligação entre um cátion metálico e um ânion ou molécula polar. Este processo permite que as substâncias fiquem mais móveis em relação ao solo e também diminui a capacidade de absorção e precipitação (LAGREGA; BUCKINGHAM; EVANS, 2010; MONCADA, 2004).

#### 2.4.2.6 Ionização

Ácidos orgânicos são compostos orgânicos, ou seja, com presença de carbono e ligações covalentes (Carbono e Hidrogênio) e com propriedades ácidas em sua composição, que tem a capacidade de ofertar elétrons em soluções aquosas, transformando-se em ânions, o que elevará consideravelmente seu potencial de mobilidade na água.

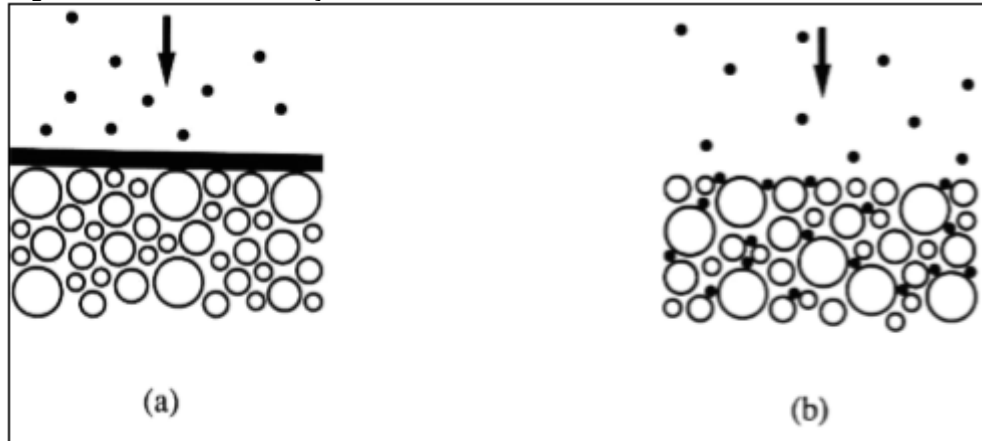
#### 2.4.2.7 Filtração

A água subterrânea que se encontra contaminada, além de substâncias dissolvidas, constantemente possui partículas em suspensão, que podem acabar sendo o poluente, como pó pouco solúvel ou bactérias, ou ainda abrigar substâncias poluentes sorvidas, como por exemplo compostos orgânicos sorvidos em grãos de argila, metais ou matéria orgânica coloidal.

No momento em que a água, já contendo partículas em suspensão, entra no solo, uma parcela do material suspenso fica contido na superfície, por conta de que as partículas maiores que a abertura dos poros não conseguem infiltrar-se no solo.

Com isso, é formada uma membrana de alta resistência que dificultará não só a percolação, mas também o acesso de partículas finas no solo (MONCADA, 2004). A figura 4 ilustra os efeitos da filtração no solo.

Figura 4 – Efeitos de filtração



Fonte: Moncada (2004).

Na figura 4 tem-se (a) a formação de uma membrana superficial e (b) processo de retenção no solo.

### 3 AUTÔMATOS CELULARES

Os autômatos celulares são constituídos por uma classe genérica de modelos de sistemas dinâmicos no qual são simples e ainda abrangem uma variedade de comportamentos. Em razão disso, os pesquisadores os consideram a ferramenta eleita no estudo do comportamento geral de sistemas dinâmicos complexos (BAR-YAM, 1997).

Segundo Slimi et al. (2009), os autômatos celulares foram originados no final da década de 40 em sistemas descritos pelo húngaro John Von Neumann e o polaco Stanislaw Ulam, os dois matemáticos que estudaram a auto reprodução em sistemas biológicos.

Estes autômatos são dinâmicos e discretos em espaço e tempo, operando em uma área entrelaçada regular infinita ou uniformemente finita e são caracterizados por interações locais. Cada célula é associada a um estado, dado em um conjunto discreto e é atualizada baseando-se no estado anterior das suas células vizinhas de acordo com um conjunto de regras. Em suma, estes modelos basicamente dividem um domínio espacial em partes, considerando cada uma destas como uma célula. Estas células, por sua vez, possuem um estado considerado como inicial. O estado em que a célula se encontra sofre modificações dependendo de si mesmo e dos estados das células vizinhas em um determinado intervalo de tempo, de acordo com regras previamente definidas, buscando tornar as simulações o mais real possível, conforme descreve Martins (2012).

Contudo, os autômatos celulares não são ferramentas para previsões e nem usados como formas de substituir os modelos matemáticos tradicionais, mas como uma simulação inicial para formular estes modelos. Portanto, os autômatos buscam descrever o comportamento macroscópico dos fenômenos (PEIXOTO; BARROS, 2004).

#### 3.1 DEFINIÇÃO

O Autômato celular é formado por uma grade de células e sua evolução ocorre em passos de tempo discretos. Além disso, o estado futuro de uma célula pode

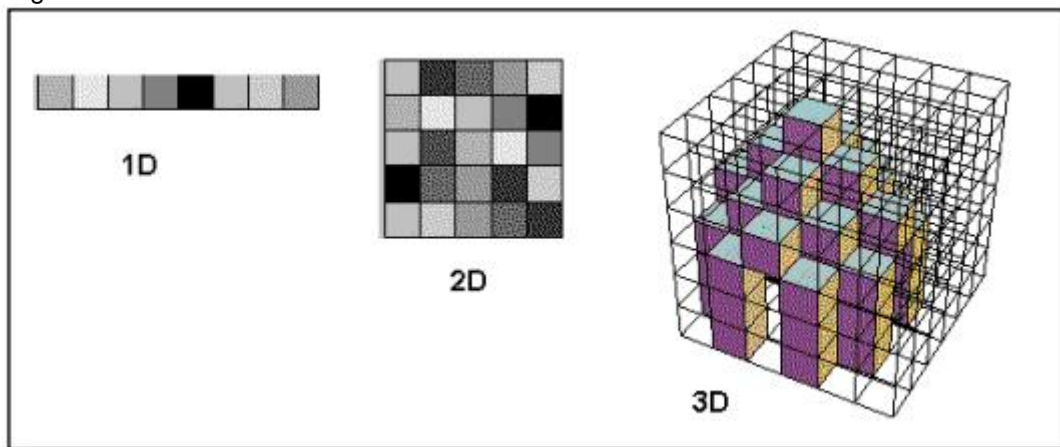
ser definido pelo seu estado atual e também em relação as suas células vizinhas (CASTRO; CASTRO, 2008).

Os autômatos celulares podem ser definidos pelo seguinte modelo:  $AC = (L, S, N, f)$ , sendo que  $L$  representa uma rede ou grade regular no espaço formada pelas células,  $S$  um conjunto de estados,  $N$  a vizinhança e  $f$  representando uma função de transição, comumente chamada de regras (LIMA, 2007).

### 3.1.1 Dimensão de um autômato celular

Na modelagem de um autômato celular, é definido um espaço, também chamado de domínio de dimensão  $d$ , onde este é preenchido por uma grade, dividida em células. A grade, onde as células estão dispostas, podem possuir diferentes dimensões, sejam elas: uni, bi ou tridimensional, conforme ilustra a figura 5.

Figura 5 – Dimensões do autômato celular



Fonte: Gremonini e Vicentini (2008).

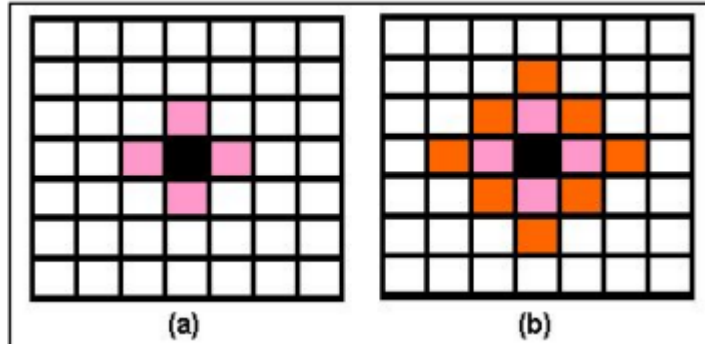
As grades ou fronteiras como também é chamada, podem ser finitas ou infinitas; em testes e simulações em computadores, estas grades são consideradas finitas.

### 3.1.2 Vizinhança

A vizinhança em um autômato celular, é definida como os limites de uma célula para com a outra. A definição de como os vizinhos irão se comportar em cada

interação, dependerá do problema a ser resolvido, a fim de escolher o modelo mais adequado. As figuras 6, 7 e 8 apresentam alguns exemplos de vizinhanças.

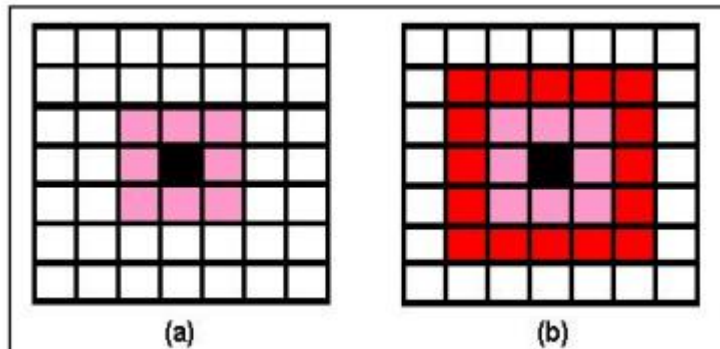
Figura 6 – Vizinhanças de Von Neumann



Fonte: Gremonini e Vincentini (2008).

Na vizinhança de Von Neumann, apenas as células norte, sul, leste e oeste da célula avaliada, são afetadas

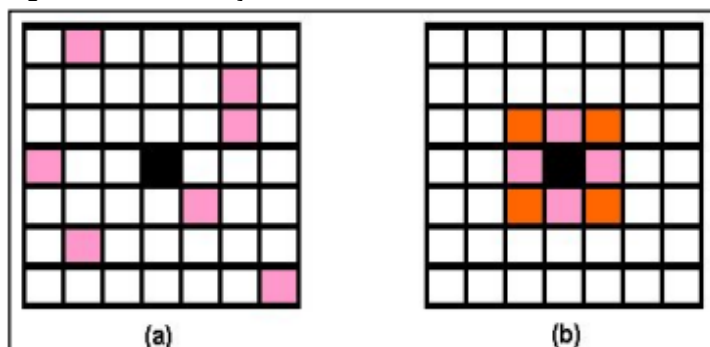
Figura 7 – Vizinhanças de Moore



Fonte: Gremonini e Vincentini (2008).

Moore abrange todas as células vizinhas que tem contato com a célula principal.

Figura 8 – Vizinhanças Aleatórias e arbitrárias



Fonte: Gremonini e Vincentini (2008).

As vizinhanças aleatórias e arbitrárias não seguem um princípio lógico, sempre serão afetadas com base nas regras que ditarão sua evolução.

### **3.1.3 Estados**

Uma célula é formada por um conjunto de variáveis, que a cada interação podem sofrer modificações. Os valores atuais das variáveis de uma célula, determinam o estado em que ela se encontra.

### **3.1.4 Regras**

O autômato celular é constituído por regras, também chamadas de funções de transição. Alves e Gagliardi (2006) descrevem que as regras são responsáveis por trazer dinamicidade as células, alterando seu estado atual. Sem estas regras, as células de um autômato seriam estáticas e não fariam sentido as simulações. As regras determinam o próximo estado das células e de suas vizinhas, durante a próxima interação. Os estados de todas as células são atualizados conforme seus valores e de seus vizinhos. Estas regras são definidas em:

- a) determinísticas: a implementação deve conter todas as vizinhanças e as regras dependem de configurações prévias;
- b) totalística: o estado da célula mudará apenas quando um número específico de vizinhos estiver em um estado determinado, independente das demais células;
- c) probabilística: os resultados são previstos conforme a probabilidade, sem regras estabelecidas para as vizinhanças.

### **3.1.5 Interação**

Uma interação ocorre quando as células de um autômato fazem uma leitura de seu estado e dos estados das suas células vizinhas. Durante este processo, são empregadas as regras atribuídas e de acordo com o resultado, o estado atual da célula é modificado.



## 4 TRABALHOS CORRELATOS

Com o objetivo de viabilizar o projeto, foram realizadas pesquisas em trabalhos relacionados a área, o objetivo para tal é buscar outras referências e as formas pelas quais os demais projetos foram desenvolvidos.

### 4.1 MODELO DE AUTÔMATO CELULAR PARA DOENÇA DE CHAGAS

Este trabalho foi realizado por R. Slimi, S. El Yacoubi, E. Dumonteil, S. Gourbière na universidade de Perpignan na França em 2007. Seu objetivo era estudar o processo de dispersão da doença de chagas e criar um modelo de autômato celular baseado nessa dispersão. O trabalho estuda inicialmente o comportamento normal de um autômato celular e posteriormente foi feita a implementação de um modelo baseado em duas dimensões e com células formando uma área de 30 x 30, onde tais células representam casas em um vilarejo, para o estudo da proliferação de insetos, o que causa a contaminação das pessoas contraindo a doença (SLIMI et al., 2009).

### 4.2 AUTÔMATOS CELULARES: IMPLEMENTAÇÕES DE VON NEUMANN, CONWAY E WOLFRAM

O artigo escrito por Marcia Luciana Aguenta Castro e Reinaldo de Oliveira Castro em 2008 e publicado pela Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, faz uma abordagem geral sobre o modelo de autômato celular. Em seu artigo, Luciana e Reinaldo realizam a definição de um autômato celular, suas características e propriedades fundamentais. Para um melhor entendimento, em seu artigo os autores demonstram o exemplo do Jogo da Vida, onde demonstra o funcionamento de uma célula em uma grade, seu estado inicial e como estes estados mudam conforme o passar do tempo, através das interações dos autômatos (CASTRO; CASTRO, 2008).

#### 4.3 UM ESTUDO DE AUTÔMATOS CELULARES PARA O ESPALHAMENTO GEOGRÁFICO DE EPIDEMIAS COM PARÂMETRO FUZZY

O trabalho descrito por Peixoto e Barros (2004) publicado pela Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional em Campinas, São Paulo, desenvolve um estudo e uma simulação com autômatos celulares no espalhamento de epidemias. Em seu artigo, os autores aplicam o modelo SIR (Suscetíveis, Infectados e Recuperados) para a representação do autômato, este modelo é comumente utilizado para representação de epidemias. Nesta abordagem, as células representam um indivíduo que pode ou não ser contaminado e se encontra em um dos três estados: suscetível, infectado ou recuperado.

#### 4.4 TRANSIM: SIMULADOR DE TRÁFEGO URBANO, BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES

O TRANSIM - software baseado em autômato celular para dispositivos móveis, foi criado pelo acadêmico Filipe de Betio Pizzolo na Universidade do Extremo Sul Catarinense em Criciúma no ano de 2015. Seu estudo baseou-se na utilização de autômatos celulares como simulação para que possa ser visualizado o fluxo de veículos em grandes cidades. Em seu exemplo, é citado a chegada ao campus, onde o trânsito se torna caótico e problemático nos horários de chegada e saída da universidade. Sua intenção nesta demonstração era a possibilidade dos agentes de trânsitos e engenheiros de trânsito a tomarem decisões baseando-se no fluxo elevado de tráfego em determinadas regiões. Para desenvolvimento de seu projeto, foi representada a grade do autômato, como sendo a via, por onde o trânsito fluirá. Cada trecho desta via, foi denominado como célula para o protótipo, os estados destas células dependem das informações do veículo, sejam estas: velocidade, tamanho, peso, entre outros. Sua função de transição é definida em como o veículo irá se movimentar (PIZZOLO, 2015).

#### 4.5 UM NOVO CONJUNTO DE REGRAS PARA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO E CRIAÇÃO DE VIAS UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES

O trabalho proposto por Custodio (2017) aplica um novo conjunto de regras para o protótipo TRANSIM, um simulador de tráfego urbano para dispositivos móveis, além de uma melhoria na interação com o usuário ao utilizar o protótipo. Ao utilizar o simulador, o usuário poderá construir o circuito pelo qual os veículos irão transitar, além de um aumento na quantidade de células e do tamanho da grade do autômato celular, permitindo que seja construído circuitos mais bem elaborados para a simulação.

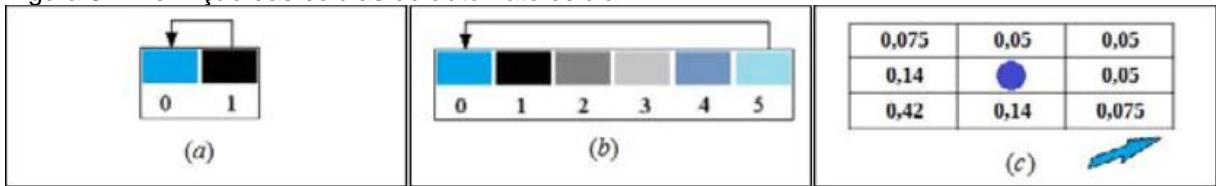
#### 4.6 MODELO DE AUTÔMATO CELULAR BASEADO NO ESPALHAMENTO DE FLUIDOS

O modelo proposto por Lima, Oliveira e Lima (2016) demonstra uma previsão do espalhamento de fluidos tóxicos em um ambiente simulado em um determinado tempo. Foi considerada uma rede bidimensional quadrada, onde cada célula representa o estado de uma área. Os estados possíveis a uma célula foram representados por cores, conforme figura 9, totalizando seis estados possíveis para a célula. A regra para a qual cada uma destas células mude de estados, está associada a probabilidade e a periodicidade, sendo que a cada iteração os estados da malha são atualizados.

Se em um instante uma célula estiver no estado azul (não contaminada) e sua vizinha em um estado de contaminação, há a probabilidade de que na próxima iteração, a célula mude para o estado preto (contaminada)

A atualização no estado da cor de uma célula é definida por  $t = 2$ , portanto, a cada dois intervalos de tempo a célula terá um incremento em sua cor. Se uma das células estiver com a cor azul clara, significa que ela está levemente contaminada, então ela passará a ficar neste estado por um período de tempo indefinido, ou até que ela evapore. Esta evaporação é probabilística e quando ocorre, diminui a concentração da contaminação. O vento ou direção da correnteza também são fatores levados em consideração neste estudo, indicado na figura 9 (c), o vento modifica a probabilidade da célula alterar para o estado de contaminada.

Figura 9 – Definição das células do autômato celular



Fonte: Lima, Oliveira e Lima (2016).

## 5 SIMULADOR DA PROPAGAÇÃO DE FLUÍDOS TÓXICOS NO SOLO

Os autômatos celulares possuem a característica de dividir um domínio espacial em partes denominadas células, sendo assim, possível determinar regras que alteram seus estados. As regras, normalmente levam em consideração o estado atual da célula avaliada. Em cada passo de tempo, as regras são aplicadas e determinam a evolução do autômato no decorrer da simulação.

O protótipo implementado trata-se de um simulador da propagação de fluidos tóxicos no solo, modelado por um autômato celular.

O desenvolvimento do protótipo tem como objetivo demonstrar o funcionamento de um autômato celular através de uma simulação da propagação de fluidos tóxicos no solo, identificando formas de aplicação do autômato.

### 5.1 METODOLOGIA

Foi realizado um levantamento bibliográfico do transporte de contaminantes no solo, os processos químicos e físicos envolvidos, bem como um estudo do funcionamento dos autômatos celulares para aplicação em propagação de fluidos.

Posteriormente, foi definido o modelo de autômato celular que seria utilizado para a implementação. Durante esta etapa, foi identificado que os modelos existentes, não se adequariam as regras propostas. Por essa razão, tornou-se necessário o desenvolvimento de um modelo próprio, tornando possível a aplicação das regras determinadas para a propagação dos fluidos.

O protótipo foi desenvolvido em HTML 5 e Javascript, utilizando o Visual Studio Code para edição dos arquivos e o sistema operacional utilizado foi o Microsoft Windows 10. Sua utilização foi motivada pela gratuidade e facilidade de acesso e utilização, sendo necessário apenas o navegador e um editor de texto para a continuidade ou pesquisa no trabalho.

Pela natureza porosa dos solos, optou-se pela lei de Darcy, a saber:

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \quad (2)$$

no qual  $v$  (m/s) é a velocidade de escoamento do contaminante,  $k$  (m<sup>2</sup>) é a permeabilidade do material poroso que neste caso é o solo,  $\mu$  (Pa.s) é a viscosidade

do fluido contaminante e  $p$  (Pa) é a pressão fluidostática. Essa expressão mostra que o movimento do fluido contaminante tende a ir das regiões de maior pressão para o de menor pressão.

Para implementar a equação 2 nas regras para as células do autômato celular, o gradiente da pressão ( $\nabla p$ ) deve ser aproximado como uma diferença entre as células vizinhas. Com base nisto, a equação 1 pode ser aproximada para

$$q_j = D (p_i - p_j), \quad (3)$$

onde  $q_j$  ( $m^3/s$ ) é a vazão volumétrica da interface que delimita a célula  $i$  da célula  $j$ ,  $p_i$  é a pressão da célula em estudo e  $p_j$  a pressão de uma das células vizinha e  $D$  ( $m^3/Pa.s$ ) é o fator de “difusão”. O fator de difusão é assim chamado convenientemente devido a sua semelhança com a difusividade binária entre espécies químicas apresentado na lei de Fick. Vale lembrar que a unidade do fator de difusão é diferente da difusividade binária ( $m^2/s$ ). Para maiores informações sobre a difusividade binária e lei de Fick é sugerida a leitura de Incropera *et al*, 2008. Para o presente caso, o fator de difusividade é dado por,

$$D = A \frac{k}{\mu L}, \quad (4)$$

onde  $A$  ( $m^2$ ) é a área da interface que delimita as células e  $L$  ( $m$ ) é a distância entre os pontos centrais das células.

O fator de difusividade foi limitado para valores entre 0,01 e 0,5, durante a simulação. O motivo da limitação é de não causar distorções nos valores de massa nas células do autômato celular.

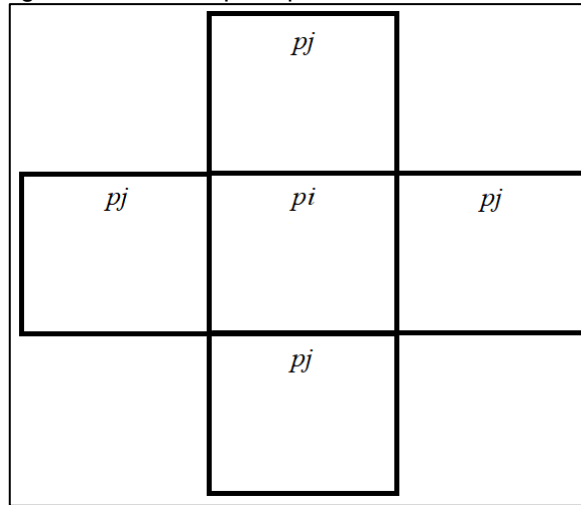
Após calcular todos os valores  $q_j$  das quatro células autômatas vizinhas tem-se a quantidade de fluido absorvido pela célula autômata  $i$ . Conseqüentemente, a sua pressão também mudará, a pressão aqui adotada, é proporcional a quantidade  $q_T$  de fluido absorvido pela célula, ou seja

$$p_i = C q_T, \quad (5)$$

onde  $C$  é uma constante de proporcionalidade e, para fins de simplificação, o seu valor foi assumido igual a 1.

A ilustração que segue na figura 10 apresenta a célula  $i$  com sua pressão  $p_i$  e as células vizinhas  $j$  com suas respectivas pressões  $p_j$ .

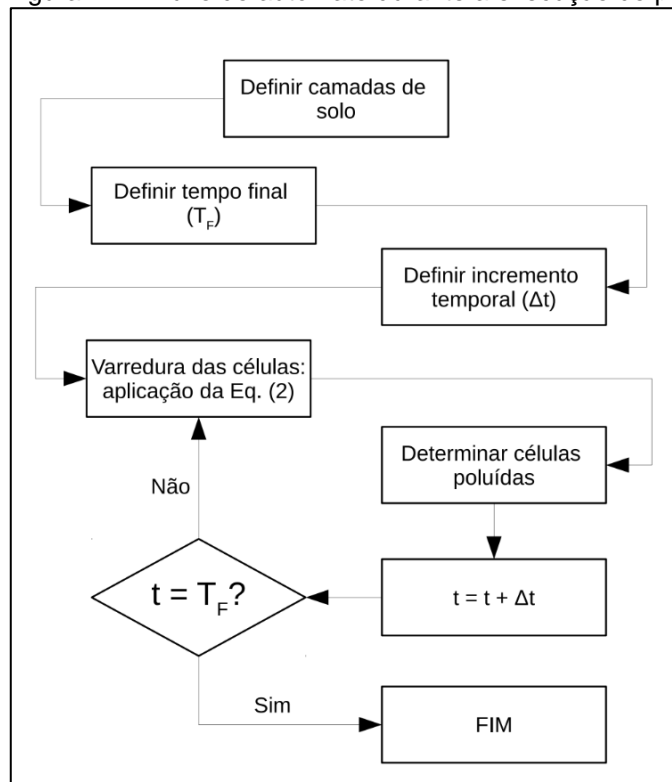
Figura 10 – Célula principal e suas vizinhas



Fonte: Do autor.

A figura 11 demonstra os passos do autômato durante a execução do protótipo.

Figura 11 – Fluxo do autômato durante a execução do protótipo



Fonte: Do autor.

## 5.2 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS OBTIDOS

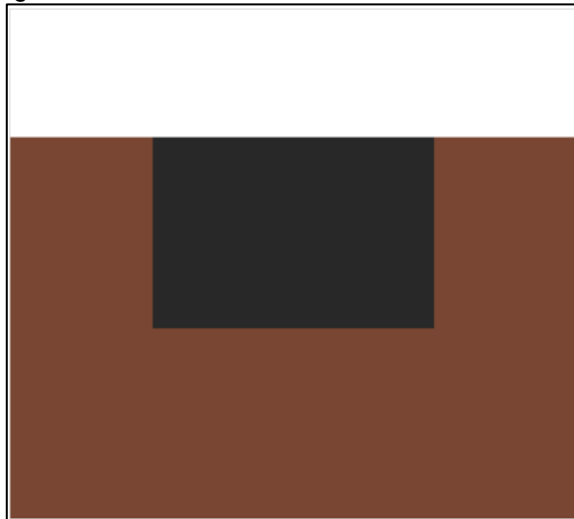
O desenvolvimento do protótipo tem como objetivo demonstrar a aplicabilidade da teoria dos autômatos celulares em um simulador para a propagação de fluidos no solo, visto que um autômato celular permite a representação de fenômenos naturais, sociais, físicos, químicos, entre outros fenômenos complexos.

O modelo de autômato celular criado para o desenvolvimento do protótipo possui as seguintes características:

- a) dimensão do autômato celular: bidimensional;
- b) forma geométrica da célula: quadrangular;
- c) vizinhança: Von Neumann;
- d) tamanho da vizinhança: Raio igual a 1 pixel, sendo as células adjacentes a célula central;
- e) transição: A transição dos estados ocorre conforme o índice de massa de poluição é dividido, entre as células vizinhas, levando em conta as características parametrizadas das camadas de solos. Dentre elas estão o fator de difusão, o tempo para execução da simulação e a espessura de cada camada de solo;

Para descrever a propagação de fluidos tóxicos no solo, foi criado um tanque de decantação que possui um tamanho de 500 colunas por 450 linhas, com um total de 225.000 células. A figura 12 demonstra o estado inicial do autômato e como as células foram dispostas na grade.

Figura 12 – Estado inicial das células do simulador

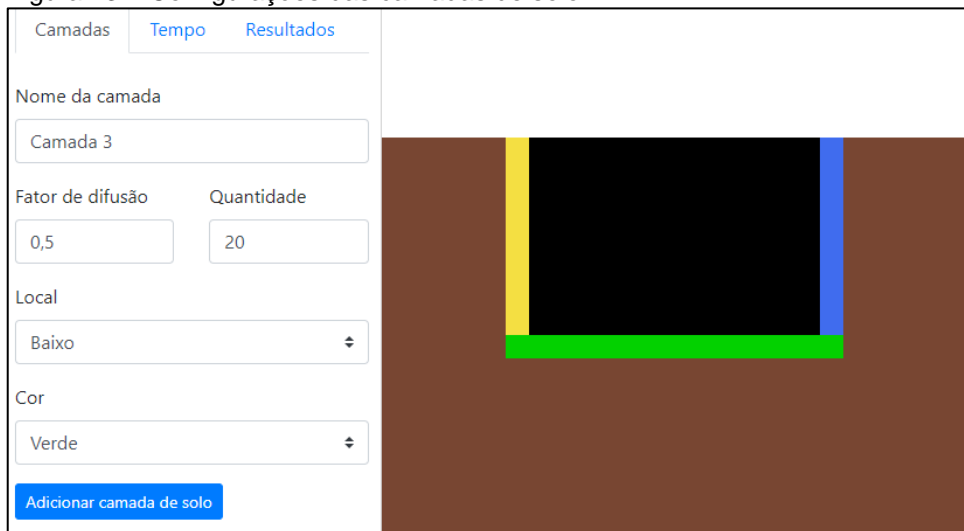


Fonte: Do autor.



Durante o processo de configuração de execução do autômato é possível determinar as camadas do solo que junto do fator de difusão, limitarão a mobilidade com que o fluido se espalhará, este fator poderá ser configurado entre 0,01 a 0,5, quanto menor o fator de difusão, maior será a resistência do solo, perante ao fluido. A figura 13 ilustra as camadas dispostas no simulador e onde as camadas e o fator de difusão são informados.

Figura 13 – Configurações das camadas de solo



Fonte: Do autor.

Além das camadas, é possível definir o tempo pelo qual o simulador executará, este tempo é definido por um incremento temporal responsável por representar o ciclo de repetição e um limite, que define até onde o simulador deve continuar executando. Tanto o incremento temporal, quanto o limite, podem ser informados em dias, semanas, meses e anos. A figura 14 demonstra esta configuração, onde desejamos que o simulador incremente de 2 em 2 dias por um período de 5 meses.

Figura 14 – Configurações de tempo para a simulação

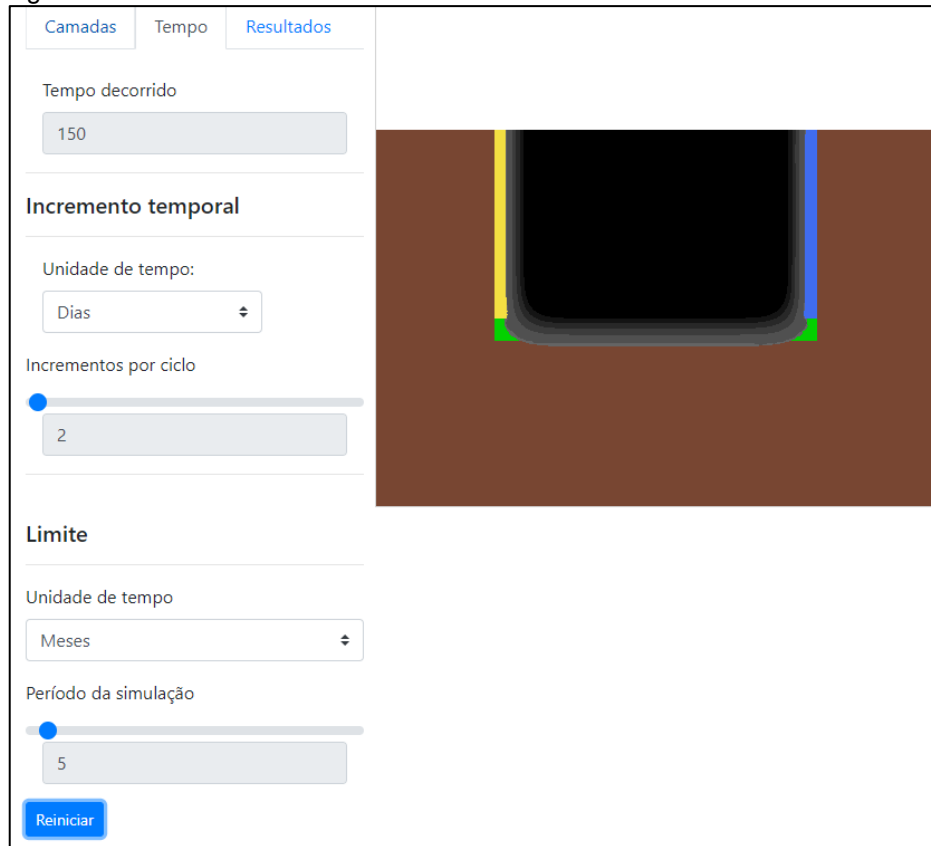
Fonte: Do autor.

Os estados foram criados para determinar como a célula será apresentada. Estes estados são o resultado da forma inicial do autômato e de sua evolução ao longo do tempo, respeitando as possíveis configurações prévias. As células podem apresentar os seguintes estados:

- a) solo: Estado ao qual a célula não possui contaminação pelo fluido
- b) camada de solo: Estado ao qual a célula não possui contaminação, mas os valores de permeabilidade são diferentes das células do solo
- c) contaminado: Estado ao qual a célula apresenta quantidade mássica considerada como poluída. Para células poluídas as cores variam de forma crescente entre cinza claro e preto, conforme a massa que a célula vai recebendo de seus vizinhos poluídos.

A figura 15 mostra a escala de cores para o estado contaminado da célula, onde as cores variam entre cinza claro até preto.

Figura 15 – Escala de cores das células



Fonte: Do autor.

Durante a varredura do autômato para aplicação das regras dos autômatos são realizadas duas ações. A primeira é com relação aos valores de massa que cada célula possui avaliando a célula principal e seus vizinhos, aplicando a equação 2. A figura 16 demonstra este processo sendo realizado.

Figura 16 – Processamento das regras dos fluídos

```

function processarRegraFluido(cell, neighbors) {
  //Caso seja fluido, aplicamos a regra
  if (cell.fluido) {
    var vizinhos = [];
    vizinhos.push(neighbors[solo.TOP.index]);
    vizinhos.push(neighbors[solo.LEFT.index]);
    vizinhos.push(neighbors[solo.RIGHT.index]);
    vizinhos.push(neighbors[solo.BOTTOM.index]);

    //Para cada vizinho da célula que estamos processando, aplicamos o cálculo da nova massa em relação
    //à célula
    for (var i = 0; i < vizinhos.length; i++) {
      if (vizinhos[i] && !vizinhos[i].espacoVago) {
        //Formula: m(vizinho) = m(vizinho) - d(solo) * (m(vizinho) - m(fluido))

        var mVizinho = vizinhos[i].m;

        // Aqui calculamos a nova massa do vizinho
        vizinhos[i].m = (vizinhos[i].m - (vizinhos[i].d * (vizinhos[i].m - cell.m)));

        //Aqui calculamos a massa da célula em questão, em relação ao vizinho
        cell.m = (cell.m + (cell.d * (mVizinho - cell.m)));
        //caso a massa de um vizinho, ultrapasse 10%, será considerado como poluído
        if (vizinhos[i].m > (solo.valorMassaFluido * 0.1))
          vizinhos[i].fluido = true;
      }
    }
  }
}

```

Fonte: Do autor.

A figura 16 nos demonstra como é aplicada a regra nos fluídos, portanto o primeiro passo é identificar se a célula em questão é um fluido ou não, durante a formação do estado inicial das células, a propriedade chamada de fluido é determinada como verdadeiro ou falso para cada célula para facilitar o processo de identificação neste momento. Caso a quantidade de massa que as células vizinhas avaliadas, ultrapasse 10%, a mesma será considerada como fluido nas próximas interações realizadas no autômato e atualizada para visualização do usuário, com a escala de cores de solo poluído.

Após a aplicação da fórmula e distribuição de massa entre as células, é realizada uma verificação para determinar a cor da célula que foi anteriormente avaliada. Esta determinação pode ser visualizada na figura 17.

Figura 17 – Função que determina a cor de cada célula

```
getColor: function () {
  if (this.espacoVago)
    return 0;
  if (this.fluido) {
    if (this.m < (solo.valorMassaFluido * 0.10))
      return 2;
    if (this.m < (solo.valorMassaFluido * 0.20))
      return 3;
    if (this.m < (solo.valorMassaFluido * 0.30))
      return 4;
    if (this.m < (solo.valorMassaFluido * 0.40))
      return 5;
    if (this.m < (solo.valorMassaFluido * 0.50))
      return 6;
    return 7;
  }
  if (this.corCamada)
    return this.corCamada;
  //Caso não tenha uma propriedade definida, retornamos solo por default
  return 1;
},
```

Fonte: Do autor.

A função demonstrada na figura 17, realiza uma verificação das células entre espaço vago, fluido e cor de camada do solo, conforme essas propriedades são modificadas, as células ganham novas cores. Além disso, para células do tipo fluido, são determinadas cores conforme o percentual de massa que a célula em questão adquire de suas vizinhas poluídas. A figura 18 representa a paleta de cores para os valores retornados pela função *getColor*.

Figura 18 – Paleta de cores representando os estados de cada célula

```

solo.palette = [
    "68, 36, 52, 0", //Vazio
    "120, 70, 50, 1", //Terra
    "100,100,100", //Nível 1 de poluição do fluído
    "80,80,80", //Nível 2 de poluição do fluído
    "60,60,60", //Nível 3 de poluição do fluído
    "40,40,40", //Nível 4 de poluição do fluído
    "20,20,20", //Nível 5 de poluição do fluído
    "0, 0, 0", //Nível máximo de poluição do fluído
    "244, 223, 66", //camada 1 de solo
    "64, 108, 239", //camada 2 de solo
    "3, 209, 0" //camada 3 de solo
];

```

Fonte: Do autor

Ao final da simulação, os resultados são exibidos em um gráfico, que demonstra o percentual que cada camada configurada recebeu de células contaminadas. A figura 19 ilustra estes resultados.

Figura 19 – Resultados da poluição em cada camada de solo



Fonte: Do autor.

A propagação dos fluídos foi desenvolvida em um ambiente modelado para a simulação em questão, portanto, não leva em consideração variáveis como pressão e gravidade. Além disso, durante o desenvolvimento do simulador, foi identificado que

o mesmo possui a limitação de aplicar a equação 2 em uma varredura de pixel a pixel, o que impede uma distribuição exata de valores as células. Uma varredura e aplicação da fórmula em âmbito geral seria o ideal, para resultados mais precisos.

## 6 CONCLUSÃO

Os autômatos celulares foram criados com base na correlação entre as áreas de conhecimento. Sua importância está em sua aplicabilidade em sistemas onde há uma evolução no decorrer do tempo. As simulações com o uso de autômatos celulares permitem uma visualização prévia de comportamentos naturais ou artificiais proporcionando assim que problemas sejam evitados no decorrer do tempo.

O protótipo desenvolvido tomou por base, tantos outros modelos já desenvolvidos para adaptação de um autômato celular para o modelo proposto e proporcionou uma visualização clara desta correlação entre as áreas, podendo modelar situações da vida real aplicadas ao autômato celular.

Após o término da prototipação, observou-se que os objetivos propostos foram alcançados, podendo assim, entender o funcionamento de um autômato celular, como podem ser desenvolvidos, a modelagem comportamental dos autômatos com base no problema que se deseja solucionar, além de aplica-lo ao meio ambiente, com foco na propagação de fluidos. Além disso, foi possível observar que estes modelos têm muito a oferecer quando empregados no solo e no meio ambiente, pois há um leque muito abrangente de situações, onde simulações podem ser utilizadas para prevenção e observação de consequências.

Para tornar possível o desenvolvimento do protótipo, o estudo de diversos autômatos celulares foi necessário, entender a diferença entre eles, a forma com que resolvem o problema proposto e também como foram desenvolvidos.

A maior dificuldade durante o desenvolvimento foi a criação das regras para a transferência de massa entre as células do autômato, determinar como seriam distribuídas e aplicadas visualmente, pois a representação de uma célula do autômato foi com base em pixel. Portanto, o desafio estava em solucionar a propagação do fluido, em pixels. Esta dificuldade foi superada graças aos estudos e auxílio do Professor Estevan Grosch Tavares.

Além destas dificuldades, durante a elaboração dos resultados para geração do gráfico, percebeu-se a necessidade de informar nomes dinâmicos as camadas, para ser possível sua exibição no gráfico. Para isso, foi necessária uma mudança na forma com que as camadas eram definidas, esta dificuldade foi superada, graças ao entendimento da forma como é possível definir variáveis em JavaScript,



tornando possível armazenar valores e recupera-los, pelo nome da camada, armazenados em uma lista auxiliar durante a configuração do autômato.

Durante a prototipação, percebeu-se problemas com o modelo proposto, quando levado em consideração a forma com que a massa do fluido é distribuída pelas células, por esta razão não houve uma aproximação adequada ao modelo real de uma propagação.

Proponho como trabalhos futuros o desenvolvimento de autômatos celulares em outras áreas de conhecimento. Também a possibilidade de se dar continuidade a este protótipo, agora aplicando as regras de pressão e gravidade e outras variáveis possíveis a equação aqui proposta, no intuito de aproximar o modelo a vida real, aumentando sua exatidão em simular a propagação.

Uma outra proposta seria a mudança na distribuição de massa entre as células, a varredura.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Domingos; GAGLIARDI, Henrique Fabricio. **Técnicas de Modelagem de Processos Epidêmicos e Evolucionários**. 26. ed. São Carlos: Sbmec, 2006. 92 p.

AGUIAR, M. S.; COSTA, A. C. R. **Autômatos celulares para análise da monotonicidade da declividade de áreas geológicas**. Porto Alegre, 2001.

ALMEIDA, Josimar Ribeiro de. **Ciências Ambientais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Thex, 2008. 766 p.

ANDRADE, Juli Ano de Almeida; AUGUSTO, Fabio; JARDIM, Isabel Cristina Sales Fontes. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**. São Paulo, v. 35, n. 2010, p.17-43, set. 2010.

Trimestral. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-46702010000300002&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46702010000300002&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 25 set. 2017.

ARAUJO, Gustavo Henrique de Sousa; ALMEIDA, Josimar Ribeiro de; GUERRA, Antônio José Teixeira. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. 320 p. ISBN 8528610950.

BARROS-PLATIAU, Ana Flávia; VARELLA, Marcelo Dias; SCHLEICHER, Rafael T.. Meio ambiente e relações internacionais: perspectivas teóricas, respostas institucionais e novas dimensões de debate. **Rev. bras. polít. int.**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 100-130, Dec. 2004 . Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-73292004000200004&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-73292004000200004&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 20 maio 2017.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0034-73292004000200004>.

BAR-YAM, Yaneer. **Dynamics of Complex Systems**. Massachusetts: Addison-wesley, 1997. 837 p.

BEAR, Jacob. **Dynamics of Fluids in Porous Media**. New York: American Elsevier Publishing Company, 1972.

BRAGA, Benedito et al. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

BRASIL. Constituição (1981). Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981. **Política Nacional do Meio Ambiente**. Brasília, DF, Disponível em:  
<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm)>. Acesso em: 16 abr. 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Agenda 21 Brasileira**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-brasileira>>. Acesso em: 20 maio 2017.

BRILHANTE, Ogenis Magno. **Gestão e avaliação da poluição, impacto e risco na saúde ambiental**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 1999. 73 p. Disponível em:

<<http://books.scielo.org/id/ffk9n/03>>. Acesso em: 07 mai. 2017.

CANADA. **Canadian Environmental Assessment Act**. Canada: Minister Of Justice, Capítulo 19, Seção 52. Disponível em: <<http://laws-lois.justice.gc.ca/PDF/C-15.21.pdf>>. Acesso em: 07 mai. 2017.

CASTRO, A. Gomes de; DUARTE, Armando; SANTOS, Tereza Rocha. **O Ambiente e a Saúde**. Lisboa: Instituto Piaget, 2003.

CASTRO, Marcia Luciana Aguenta; CASTRO, Reinaldo de Oliveira. Autômatos celulares: Implementações de von neumann, conway e wolfram. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**. Valinhos, v. 3, n. 3, p.89-106, 08 dez. 2008. Disponível em:

<<http://pgsskroton.com.br/seer/index.php/rcext/article/view/2370/2274>>. Acesso em: 22 abr. 2017.

COIMBRA, José de Avila Aguiar. **O outro lado do meio ambiente: uma incursão humanista na questão ambiental**. Campinas, SP: Millennium Editora, 2002.

CRICIÚMA (Município). Lei nº 4440, de 13 de dezembro de 2002. Regulamenta o Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente – COMDEMA e dá outras providências. Criciúma, SC, Disponível em:

<<http://www.camaracriciuma.sc.gov.br/documento/lei-no-4440-4332>>. Acesso em: 13 nov. 2017.

CUNHA, Guilherme Farias et al. Princípio da precaução no Brasil após a Rio-92: impacto ambiental e saúde humana. **Ambient. soc.**, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 65-82, Sept. 2013. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414-753X2013000300005&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2013000300005&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 20 maio 2017.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2013000300005>.

CUSTODIO, Jonathan. **UM NOVO CONJUNTO DE REGRAS PARA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO E CRIAÇÃO DE VIAS UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES**. 2017. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2017.

Declaração do Rio de Janeiro. **Estud. av.**, São Paulo, v. 6, n. 15, p. 153-159, Aug. 1992 . Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40141992000200013&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141992000200013&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 20 maio 2017.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40141992000200013>.

EDWARDS, Clive A.. Assessing the effects of environmental pollutants on soil organisms, communities, processes and ecosystems. **European Journal Of Soil Biology**. Columbus, p. 225-231. jun. 2002. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1164556302011500>>. Acesso em: 13 out. 2017.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2006.

ERMENTROUT, G. Bard; EDELSTEIN-KESHET, Leah. Cellular Automata Approaches to Biological Modeling. **Journal Of Theoretical Biology**. Pittsburgh, p. 97-133. 07 jan. 1993. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022519383710076>>. Acesso em: 25 set. 2017.

GREMONINI, Lucas; VICENTINI, Eduardo. **Autômatos Celulares: Revisão Bibliográfica e Exemplos de Implementações**. UNICENTRO. 2008.

GÜNTER, WMR. **Poluição do solo**. In: Philippi Jr, A. e Pelicioni, M. C (org). **Educação ambiental e sustentabilidade**. São Paulo, Editora Manole, 2005.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ibge, 2015. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=295017>>. Acesso em: 02 set. 2017.

INCROPERA, Frank P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p. ISBN 9788521615842 (broch.).

LAGREGA, Michael; BUCKINGHAM, Phillip; EVANS, Jeffrey. **Hazardous Waste Management**. 2. ed. Long Grove: Waveland Press, Inc, 2010. 1232 p.

LEAL, Carlos Rogério. **AGENDA 21, Local**. 2004. 76 f. Monografia (Especialização) - Curso de Direito Empresarial, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2004. Disponível em: <<http://www.bib.unesc.net/biblioteca/sumario/000025/0000252D.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2017.

LEPSCH, Igo. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.

LIMA, Edgar Barbosa. **Modelos microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Computação, Universidade Federal Fluminense Edgar, Niterói, 2007.

LIMA, Marcos V B; OLIVEIRA, Cintia Carvalho; LIMA, Danielli Araújo. Uma ferramenta computacional para simulação de espalhamento de fluidos baseada em autômatos celulares bidimensionais estocásticos. **XXXVI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação**, Porto Alegre, v. 36, p.1876-1885, jul. 2016

MARTINS, Antonio Carlos da Costa. **Aplicação de autômatos celulares para modelagem de variáveis regionalizadas na mineração**. 2012. 91 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mineral, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-26072013-115454/pt-br.php>>. Acesso em: 02 abr. 2017.

MONCADA, Mônica Priscilla Hernández. **Estudo em Laboratório de**

**Características de Colapso e Transporte de Solutos Associados à Infiltração de Licor Cáustico em um Solo Laterítico.** 2004. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=5129@1](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=5129@1)>. Acesso em: 20 out. 2017.

MANZATTO, Celso Vainer; FREITAS JUNIOR, Elias de; PERES, José Roberto Rodrigues. **Uso Agrícola dos Solos Brasileiros.** Rio de Janeiro: Embrapa, 2002.

MESQUITA, Ana Carla. **USO DAS TÉCNICAS DE OXIDAÇÃO QUÍMICA E BIODEGRADAÇÃO NA REMOÇÃO DE ALGUNS COMPOSTOS RECALCITRANTES.** 2004. 158 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ODUM, E. **Fundamentos de Ecologia.** 5. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1997.

OLDEMAN, L. R., HAKKELING, R. T. A., SOMBROEK, W. G. 1991: **World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation with Explanatory Note (second revised edition)** – ISRIC, Wageningen; UNEP, Nairobi. Disponível em: <[http://www.isric.org/sites/default/files/ExplanNote\\_1.pdf](http://www.isric.org/sites/default/files/ExplanNote_1.pdf)>. Acesso em 20 set. 2017.

OLIVEIRA, Leandro Dias de. Da Eco-92 à Rio +20: uma breve avaliação de duas décadas. **Boletim Campineiro de Geografia**, Campinas, v. 2, n. 3, p.479-499, dez. 2012. Disponível em: <<http://agbcampinas.com.br/bcg/index.php/boletim-campineiro/issue/view/v.2,n.3,2012>>. Acesso em: 20 maio 2017.

PEIXOTO, M.s.; BARROS, L.c.. Um Estudo de Autômatos Celulares para o Espalhamento Geográfico de Epidemias com Parâmetro Fuzzy. **Tema - Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, Campinas, v. 5, n. 1, p.125-134, 13 abr. 2004. Brazilian Society for Computational and Applied Mathematics (SBMAC). <http://dx.doi.org/10.5540/tema.2004.05.01.0125>. Disponível em: <<https://tema.sbmac.org.br/tema/article/view/347>>. Acesso em: 01 abr. 2017.

PETTS, J., EDULJEE, G. **Environmental Impact Assessment for Waste Treatment and Disposal Facilities.** John Wiley & Sons, Chichester. 1994.

PIZZOLO, Filipe de Betio. **TRANSIM: SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO URBANO PARA DISPOSITIVOS MÓVEIS, BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES.** 2015. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015. Disponível em: <<http://tcc.kironunes.net.br/?id=606&proj=422>>. Acesso em: 20 maio 2017.

RAVEN, P; BERG, L. **Environmental.** 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2004.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 495 p.

SLIMI, R. et al. A cellular automata model for Chagas disease. **Applied Mathematical Modelling**, [s.l.], v. 33, n. 2, p.1072-1085, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2007.12.028>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X07003563>>. Acesso em: 18 mar. 2017.

SPEZZANO, Giandomenico; TALIA, Domenico. Designing parallel models of soil contamination by the CARPET language. **Future Generation Computer Systems**, [s.l.], v. 13, n. 4-5, p.291-302, mar. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-739x\(97\)00031-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-739x(97)00031-9). Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167739X97000319>>. Acesso em: 08 abr. 2017.

VARENNES, A. **PRODUTIVIDADE DOS SOLOS E AMBIENTE**. Lisboa: Escolar Editora, 2003.

**APÊNDICE (S)**

## APÊNDICE A – ARTIGO

# Simulador da propagação de resíduos tóxicos no solo baseado em autômatos celulares

Marcos Paulo de Souza Zanelatto<sup>1</sup>, Sérgio Coral<sup>2</sup>, Estevan Grosch Tavares<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ciência da Computação – Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) – Criciúma – SC – Brasil

<sup>2</sup>Ciência da Computação – Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) – Criciúma – SC – Brasil.

<sup>3</sup>Engenharia Mecânica – Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) – Criciúma, SC – Brasil

marcosp.zanelatto@gmail.com, sergiocoral@unesc.net, estevangt@unesc.net

**Abstract.** Cellular automaton have been widely used in the simulation of physical, chemical, biological or other processes, such as the spread of fires and the spread of epidemics. Another way to apply cellular automaton is to simulate the propagation of fluids in a settling tank, where layers of soils of different types are used to contain these fluids. This paper brings a study of the propagation of fluids in the soil in cellular automaton that results in a prototype development in HTML and JavaScript for the simulation of the propagation of toxic fluids in the soil. The objective of this prototype is its use in simulations, promoting studies in the conciliation of cellular automaton and the environment.

**Resumo.** Autômatos celulares vem sendo amplamente utilizados na simulação de processos físicos, químicos, biológicos ou de outras naturezas, como o alastramento de incêndios e no espalhamento de epidemias. Outra forma de aplicar autômatos celulares é simulando a propagação de fluidos em um tanque de decantação, onde camadas de solos de diferentes tipos são utilizados para conter estes fluidos. Este trabalho traz um estudo da propagação dos fluidos no solo em autômatos celulares que resulta em um protótipo desenvolvimento em HTML e JavaScript para a simulação da propagação de fluidos tóxicos no solo. O objetivo deste protótipo é sua utilização em simulações, promovendo estudos na conciliação de autômatos celulares e o meio ambiente.

## 1. Introdução

A recuperação de áreas que sofreram com a contaminação, requer um estudo aprofundado sobre os tópicos relacionados a esta área, por conta desta dificuldade enfrentada, seria muito mais simples evitar a contaminação de uma área, ao invés de recuperá-la (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

Os modelos de autômatos celulares implementados são constituídos por uma malha, onde as células ficam dispostas, os estados que determinam a forma da célula naquele intervalo de tempo e as regras, responsáveis por em cada interação, determinar um novo estado para as células.



Por tais evidências, o trabalho aqui proposto, busca um estudo sobre a aplicação de autômatos celulares na poluição de solos através de fluidos tóxicos, além de uma simulação representando a contaminação de uma área e como os fluidos se alastram através do solo.

## **2. Autômatos celulares e o cuidado com o solo**

Pelo fato de que os autômatos celulares são capazes de resolver problemas complexos com implementações simples, ao longo do tempo estes vêm ganhando um espaço cada vez maior na busca de modelar os conceitos da vida real.

John Von Neumann foi o pioneiro na conceituação de autômatos celulares. Seu objetivo era levar a teoria dos autômatos para a biologia, seu principal estudo estava focado na auto-reprodução (AGUIAR; COSTA, 2001). Uma variação do conceito inicial criado por Von Neumann foi criada por Stephen Wolfram que acrescentou modelos matemáticos simples de sistemas naturais, impondo a cada célula de um autômato, um valor finito. Tais valores vão evoluindo com o decorrer do tempo em função das regras impostas a eles e os valores das células vizinhas (CASTRO; CASTRO, 2008).

O cuidado a se tomar com o solo se destaca pela sua importância em relação ao meio. Sua capacidade de armazenar nutrientes, reter água e dar suporte as plantas são suas principais funções em relação a agricultura. Contudo, seus recursos não são renováveis e precisam de reposição após a absorção das plantas. Tal reposição pode ser realizada através de adubação por exemplo. A qualidade do solo para o desenvolvimento agrícola está associada ao percentual dos componentes presentes. O alumínio por sua vez em percentual mais elevado limita a absorção dos nutrientes pelas plantas além de serem tóxicos. O solo também pode se comportar como filtro, impedindo que contaminantes presentes juntos à água, cheguem a lençóis freáticos, prejudicando um grande volume de água. Outra importância presente no solo é sua capacidade de regular o nível da água dos rios. Em períodos chuvosos, o excesso de água é parcialmente absorvido pelo solo que retém a água temporariamente evitando enchentes e alagamentos (IBGE, 2015; LEPSCH, 2002).

Com base na abstração da aplicação de autômatos celulares em diversas áreas e também sua facilidade na implementação e representação de sistemas complexos, este trabalho teve como propósito representar e aplicar a teoria dos autômatos celulares na representação de como os fluidos tóxicos se alastram no solo, através de uma simulação de sua propagação.

O desenvolvimento do simulador busca determinar aproximadamente a área afetada por fluido tóxico no solo, mostrando a importância do cuidado a se ter e a possibilidade de ser delimitado o local para tratamento e recuperação do solo afetado.

## **3. Simulador da propagação de fluidos tóxicos no solo**

O protótipo implementado trata-se de um simulador da propagação de fluidos tóxicos no solo, modelado por um autômato celular.

O desenvolvimento do protótipo tem como objetivo demonstrar o funcionamento de um autômato celular através de uma simulação da propagação de fluidos tóxicos no solo, identificando formas de aplicação do autômato.

Foi realizado um levantamento bibliográfico do transporte de contaminantes no solo, os processos químicos e físicos envolvidos, bem como um estudo do funcionamento dos autômatos celulares para aplicação em propagação de fluidos.

Posteriormente, foi definido o modelo de autômato celular que seria utilizado para a implementação. Durante esta etapa, foi identificado que os modelos existentes, não se adequariam as regras propostas. Por essa razão, tornou-se necessário o desenvolvimento de um modelo próprio, tornando possível a aplicação das regras determinadas para a propagação dos fluidos.

O protótipo foi desenvolvido em HTML 5 e Javascript, utilizando o Visual Studio Code para edição dos arquivos e o sistema operacional utilizado foi o Microsoft Windows 10. Sua utilização foi motivada pela gratuidade e facilidade de acesso e utilização, sendo necessário apenas o navegador e um editor de texto para a continuidade ou pesquisa no trabalho.

Para implementar as regras para as células do autômato celular, a equação definida para as regras foi:

$$q_j = D (p_i - p_j)$$

onde  $q_j$  ( $m^3/s$ ) é a vazão volumétrica da interface que delimita a célula  $i$  da célula  $j$ ,  $p_i$  é a pressão da célula em estudo e  $p_j$  a pressão de uma das células vizinha e  $D$  ( $m^3/Pa.s$ ) é o fator de “difusão”. O fator de difusão é assim chamado convenientemente devido a sua semelhança com a difusividade binária entre espécies químicas apresentado na lei de Fick. Vale lembrar que a unidade do fator de difusão é diferente da difusividade binária ( $m^2/s$ ).

O fator de difusividade foi limitado para valores entre 0,01 e 0,5, durante a simulação. O motivo da limitação é de não causar distorções nos valores de massa nas células do autômato celular.

Após calcular todos os valores  $q_j$  das quatro células autômatas vizinhas tem-se a quantidade de fluido absorvido pela célula autômata  $i$ . Conseqüentemente, a sua pressão também mudará, a pressão aqui adotada, é proporcional a quantidade  $q_T$  de fluido absorvido pela célula.

O modelo de autômato celular criado para o desenvolvimento do protótipo possui as seguintes características:

- a) dimensão do autômato celular: bidimensional;
- b) forma geométrica da célula: quadrangular;
- c) vizinhança: Von Neumann;
- d) tamanho da vizinhança: Raio igual a 1 pixel, sendo as células adjacentes a célula central;
- e) transição: A transição dos estados ocorre conforme o índice de massa de poluição é dividido, entre as células vizinhas, levando em conta as características parametrizadas das camadas de solos. Dentre elas estão o fator de difusão, o tempo para execução da simulação e a espessura de cada camada de solo;

Para descrever a propagação de fluidos tóxicos no solo, foi criado um tanque de decantação que possui um tamanho de 500 colunas por 450 linhas, com um total de 225.000 células.

Durante o processo de configuração de execução do autômato é possível determinar as camadas do solo que junto do fator de difusão, limitarão a mobilidade com que o fluido se espalhará, este fator poderá ser configurado entre 0,01 a 0,5, quanto menor o fator de difusão, maior será a resistência do solo, perante ao fluido. A figura 13 ilustra as camadas dispostas no simulador e onde as camadas e o fator de difusão são informados.

Além das camadas, é possível definir o tempo pelo qual o simulador executará, este tempo é definido por um incremento temporal responsável por representar o ciclo de repetição e um limite, que define até onde o simulador deve continuar executando. Tanto o incremento temporal, quanto o limite, podem ser informados em dias, semanas, meses e anos.

Os estados foram criados para determinar como a célula será apresentada. Estes estados são o resultado da forma inicial do autômato e de sua evolução ao longo do tempo, respeitando as possíveis configurações prévias. As células podem apresentar os seguintes estados:

- a) solo: Estado ao qual a célula não possui contaminação pelo fluido
- b) camada de solo: Estado ao qual a célula não possui contaminação, mas os valores de permeabilidade são diferentes das células do solo

contaminado: Estado ao qual a célula apresenta quantidade mássica considerada como poluída. Para células poluídas as cores variam de forma crescente entre cinza claro e preto, conforme a massa que a célula vai recebendo de seus vizinhos poluídos.

Durante a varredura das células o primeiro passo é identificar se a célula em questão é um fluido ou não, durante a formação do estado inicial das células, a propriedade chamada de fluido é determinada como verdadeiro ou falso para cada célula para facilitar o processo de identificação neste momento. Caso a quantidade de massa que as células vizinhas avaliadas, ultrapasse 10%, a mesma será considerada como fluido nas próximas interações realizadas no autômato e atualizada para visualização do usuário, com a escala de cores de solo poluído.

Após a aplicação da fórmula e distribuição de massa entre as células, é realizada uma verificação para determinar a cor da célula que foi anteriormente avaliada.

Ao final da simulação, os resultados são exibidos em um gráfico, que demonstra o percentual que cada camada configurada recebeu de células contaminadas.

#### **4. Trabalhos correlatos**

O Modelo de autômato celular para doença de chagas foi realizado por R. Slimi, S. El Yacoubi, E. Dumonteil, S. Gourbière na universidade de Perpignan na França em 2007. Seu objetivo era estudar o processo de dispersão da doença de chagas e criar um modelo de autômato celular baseado nessa dispersão. O trabalho estuda inicialmente o comportamento normal de um autômato celular e posteriormente foi feita a implementação de um modelo baseado em duas dimensões e com células formando uma área de 30 x 30, onde tais células representam casas em um vilarejo, para o estudo da proliferação de insetos, o que causa a contaminação das pessoas contraindo a doença (SLIMI et al., 2009).

O artigo autômatos celulares: implementações de von neumann, conway e wolfram escrito por Marcia Luciana Aguenta Castro e Reinaldo de Oliveira Castro em 2008 e publicado pela Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, faz uma abordagem geral sobre o modelo de autômato celular. Em seu artigo, Luciana e Reinaldo realizam a definição de um autômato celular, suas características e propriedades fundamentais. Para um melhor entendimento, em seu artigo os autores demonstram o exemplo do Jogo da Vida, onde demonstra o funcionamento de uma célula em uma grade, seu estado inicial e como estes estados mudam conforme o passar do tempo, através das interações dos autômatos (CASTRO; CASTRO, 2008).

O TRANSIM - simulador de tráfego urbano, baseado em autômatos celulares foi criado pelo acadêmico Filipe de Betio Pizzolo na Universidade do Extremo Sul Catarinense em Criciúma no ano de 2015. Seu estudo baseou-se na utilização de autômatos celulares como

simulação para que possa ser visualizado o fluxo de veículos em grandes cidades. Em seu exemplo, é citado a chegada ao campus, onde o trânsito se torna caótico e problemático nos horários de chegada e saída da universidade. Sua intenção nesta demonstração era a possibilidade dos agentes de trânsitos e engenheiros de trânsito a tomarem decisões baseando-se no fluxo elevado de tráfego em determinadas regiões. Para desenvolvimento de seu projeto, foi representada a grade do autômato, como sendo a via, por onde o trânsito fluirá. Cada trecho desta via, foi denominado como célula para o protótipo, os estados destas células dependem das informações do veículo, sejam estas: velocidade, tamanho, peso, entre outros. Sua função de transição é definida em como o veículo irá se movimentar (PIZZOLO, 2015).

A busca no trabalho desenvolvido, foi a correlação entre a ciência da computação e o meio ambiente, com foco no solo e na propagação de fluidos, para descrever o problema da contaminação dos solos e degradação do meio ambiente.

## 5. Conclusões

Os autômatos celulares foram criados com base na correlação entre as áreas de conhecimento. Sua importância está em sua aplicabilidade em sistemas onde há uma evolução no decorrer do tempo. As simulações com o uso de autômatos celulares permitem uma visualização prévia de comportamentos naturais ou artificiais proporcionando assim que problemas sejam evitados no decorrer do tempo.

O protótipo desenvolvido tomou por base, tantos outros modelos já desenvolvidos para adaptação de um autômato celular para o modelo proposto e proporcionou uma visualização clara desta correlação entre as áreas, podendo modelar situações da vida real aplicadas ao autômato celular.

Após o término da prototipação, observou-se que os objetivos propostos foram alcançados, podendo assim, entender o funcionamento de um autômato celular, como podem ser desenvolvidos, a modelagem comportamental dos autômatos com base no problema que se deseja solucionar, além de aplica-lo ao meio ambiente, com foco na propagação de fluidos. Além disso, foi possível observar que estes modelos têm muito a oferecer quando empregados no solo e no meio ambiente, pois há um leque muito abrangente de situações, onde simulações podem ser utilizadas para prevenção e observação de consequências.

Para tornar possível o desenvolvimento do protótipo, o estudo de diversos autômatos celulares foi necessário, entender a diferença entre eles, a forma com que resolvem o problema proposto e também como foram desenvolvidos.

A maior dificuldade durante o desenvolvimento foi a criação das regras para a transferência de massa entre as células do autômato, determinar como seriam distribuídas e aplicadas visualmente, pois a representação de uma célula do autômato foi com base em pixel. Portanto, o desafio estava em solucionar a propagação do fluido, em pixels. Esta dificuldade foi superada graças aos estudos e auxílio do Professor Estevan Grosch Tavares.

Além destas dificuldades, durante a elaboração dos resultados para geração do gráfico, percebeu-se a necessidade de informar nomes dinâmicos as camadas, para ser possível sua exibição no gráfico. Para isso, foi necessária uma mudança na forma com que as camadas eram definidas, esta dificuldade foi superada, graças ao entendimento da forma como é possível definir variáveis em JavaScript, tornando possível armazenar valores e recupera-los, pelo nome da camada, armazenados em uma lista auxiliar durante a configuração do autômato.

Durante a prototipação, percebeu-se problemas com o modelo proposto, quando levado em consideração a forma com que a massa do fluido é distribuída pelas células, por esta razão não houve uma aproximação adequada ao modelo real de uma propagação.

Proponho como trabalhos futuros o desenvolvimento de autômatos celulares em outras áreas de conhecimento. Também a possibilidade de se dar continuidade a este protótipo, agora aplicando as regras de pressão e gravidade e outras variáveis possíveis a equação aqui proposta, no intuito de aproximar o modelo a vida real, aumentando sua exatidão em simular a propagação. Uma outra proposta seria a mudança na distribuição de massa entre as células, a varredura.

## Referencias

AGUIAR, M. S.; COSTA, A. C. R. **Autômatos celulares para análise da monotonicidade da declividade de áreas geológicas**. Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, Juli Ano de Almeida; AUGUSTO, Fabio; JARDIM, Isabel Cristina Sales Fontes. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**. São Paulo, v. 35, n. 2010, p.17-43, set. 2010. Trimestral. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-46702010000300002&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46702010000300002&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 25 set. 2017.

CASTRO, Marcia Luciana Aguenta; CASTRO, Reinaldo de Oliveira. Autômatos celulares: Implementações de von neumann, conway e wolfram. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**. Valinhos, v. 3, n. 3, p.89-106, 08 dez. 2008. Disponível em: <<http://pgsskroton.com.br/seer/index.php/rcext/article/view/2370/2274>>. Acesso em: 22 abr. 2017.

IBGE. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ibge, 2015. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=295017>>. Acesso em: 02 set. 2017.

LEPSCH, Igo. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.

PIZZOLO, Filipe de Betio. **TRANSIM: SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO URBANO PARA DISPOSITIVOS MÓVEIS, BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES**. 2015. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015. Disponível em: <<http://tcc.kironunes.net.br/?id=606&proj=422>>. Acesso em: 20 maio 2017.

SLIMI, R. et al. A cellular automata model for Chagas disease. **Applied Mathematical Modelling**, [s.l.], v. 33, n. 2, p.1072-1085, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2007.12.028>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X07003563>>. Acesso em: 18 mar. 2017.