



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Tadeu Augusto de Almeida Silva

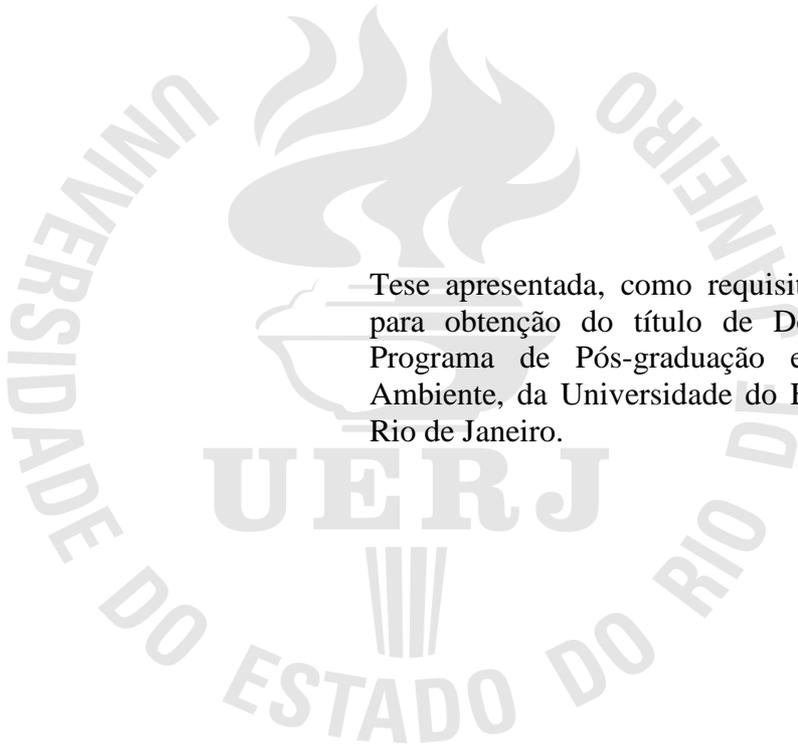
Uso de ambientes virtuais para a simulação de acidentes radiológicos

Rio de Janeiro

2012

Tadeu Augusto de Almeida Silva

Uso de ambientes virtuais para a simulação de acidentes radiológicos



Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Luiz Monteiro de Farias

Rio de Janeiro

2012

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/CTC-A

S586 Silva, Tadeu Augusto de Almeida.
Uso de ambientes virtuais para a simulação de acidentes radiológicos / Tadeu Augusto de Almeida Silva. – 2012.
137 f.
Orientador: Oscar Luiz Monteiro de Farias
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
1. Simulação (Computadores) – Teses. 2. Acidentes radioativos – Teses. 3. Realidade virtual – Teses. I. Farias, Oscar Luiz Monteiro de. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 004.946

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese.

Assinatura

Data

Tadeu Augusto de Almeida Silva

Uso de ambientes virtuais para a simulação de acidentes radiológicos

Tese submetida como requisito para
obtenção do título de Doutor, ao Programa
de Pós-graduação em Meio Ambiente da
Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovado em 26 de junho de 2012.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Oscar Luiz Monteiro de Farias (Orientador)
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof. Dr. Sérgio Machado Correa
Faculdade de Química da UERJ

Prof. Dr. Andrés Reinaldo Rodrigues Papa
Observatório Nacional

Prof. Dr. José Guilherme Pereira Peixoto
Instituto de Radioproteção e Dosimetria

Prof. Dr. Ronaldo Lemos D´Avila
Instituto de Radioproteção e Dosimetria

Rio de Janeiro

2012

DEDICATÓRIA

Aos meus pais (*in memoriam*) pela felicidade, educação e oportunidades que me foram proporcionadas.

AGRADECIMENTOS

A minha querida família: Luciana, Isabel e Leonardo, pelo cultivo do respeito e afeto.

Ao meu orientador Professor Oscar, pela constante dedicação.

Aos meus colegas e amigos do Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD que me apoiaram e me incentivaram.

Aos professores do PPG-MA/UERJ que me proporcionaram uma rica visão da questão ambiental.

A Carlos Bernardo González Pecotche (Raumsol) por seus ensinamentos, que têm me ensinado a buscar o saber.

RESUMO

DE ALMEIDA SILVA, Tadeu Augusto. *Uso de ambientes virtuais para a simulação de acidentes radiológicos*. 2012. 153 f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Em um ambiente virtual, construído com o uso de tecnologia computacional, encontram-se presentes entidades virtuais inseridas em um espaço tridimensional, que é utilizado para a simulação de processos críticos, como os acidentes radiológicos. A pronta detecção de um acidente radiológico e a determinação da sua possível extensão são fatores essenciais para o planejamento de respostas imediatas e de ações de emergência. A integração das representações georeferenciadas do espaço tridimensional, com modelos baseados em agentes autônomos, com o objetivo de construir ambientes virtuais que tenham a capacidade de simular acidentes radiológicos é a proposta dessa tese. As representações georeferenciadas do espaço tridimensional candidatas são: i) as representações espaciais usadas nos sistemas de informações geográficas (SIG) e ii) a representação adotada pelo *Google MapsTM*. Com o uso deste ambiente pode-se: quantificar as doses recebidas pelas pessoas; ter uma distribuição espacial das pessoas contaminadas; estimar o número de indivíduos contaminados; estimar o impacto na rede de saúde; estimar impactos ambientais; gerar zonas de exclusão; construir cenários alternativos; treinar pessoal técnico para lidar com acidentes radiológicos.

Palavras Chaves: Ambientes virtuais. Simulação. Acidentes radiológicos. Sistemas baseados em agentes.

ABSTRACT

In a virtual environment, built with the use of computer technology, there are virtual entities, inserted into a virtual three-dimensional space, which is used to simulate critical processes, such as radiological accidents. Early detection of a radiological accident and determining its possible extension are essential for planning an immediate response and emergency actions. The purpose of this thesis is to build virtual environments that have the ability to simulate radiological accidents. These virtual environments are based on the integration of georeferenced representations of the three dimensional space with autonomous agents-based models. The georeferenced representations candidates are: i) the spatial representation used in geographic information systems (GIS); ii) the representation adopted by *Google Maps*TM. Using these virtual environments, in case of occurrences of radiological accidents, it will be possible to quantify the doses received by people, have a spatial distribution of infected persons; estimate the number of infected individuals; estimate the impact on the health network, estimate environmental impacts, generate exclusion zones, building scenarios alternative; train staff for dealing with these accidents.

Keywords: Virtual environment. Radiological accident. Simulation. Agent-based systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Modelo de simulação	19
Figura 2 -	Blindagem das radiações.....	24
Figura 3 -	Acidente radiológico.....	25
Figura 4 -	Aplicações dos radioisótopos.....	27
Figura 5 -	Escala INES.....	30
Figura 6 -	Efeitos da radiação.....	33
Figura 7 -	Metodologia de monitoramento ambiental.....	43
Figura 8 -	Agente autônomo.....	59
Figura 9 -	A arquitetura de um ambiente virtual	62
Figura 10 -	Estrutura comum de modelos espaciais dinâmicos.....	63
Figura 11 -	Diagrama de classes de orientação de objetos-geográficos.....	65
Figura 12 -	Dispersão da pluma.....	73
Figura 13 -	Translação em 2D.....	74
Figura 14 -	Rotação em 2D.....	75
Figura 15 -	Translação em 3D.....	76
Figura 16 -	Rotação em 3 D	77
Figura 17 -	Sistema de coordenadas cartesianas	78
Figura 18 -	Fuso do sistema UTM.....	79
Figura 19 -	Referenciais da pluma (X', Y', Up), ENU ou topocêntrico (East, North,UP), ECEF (X, Y, X) e WGS-84 (λ , ϕ , h).....	80
Figura 20 -	Ferramenta de simulação baseado em SIG e agentes autônomos – Repast 3 TM	85
Figura 21 -	Ambiente virtual (AVSAR) – efeitos da radiação nas zonas de exclusão – localidade: estádio do Maracanã.....	88
Figura 22 -	Acidente radiológico de Cochabamba - simulação com o Repast3 TM	89
Figura 23 -	Estações do metrô do Rio de Janeiro.....	92
Figura 24 -	Deslocamento médio nas estações do metrô do Rio de Janeiro.....	96
Figura 25 -	Estação do metrô da Carioca no ambiente virtual.....	98
Figura 26 -	Cálculo da dose na estação do metrô da Carioca.....	98
Figura 27 -	Software Geotranz TM	101
Figura 28 -	Sistema de avaliação radiológica.....	102
Figura 29 -	Dispersão da pluma radioativa na usina nuclear de Angra dos Reis	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Limite de doses anuais.....	34
Tabela 2 -	Comparação das doses estimadas com a simulação do Repast 3 TM	90
Tabela 3 -	Resultado da dosimetria citogenética feita pela ARN.....	91
Tabela 4 -	Comparação das doses estimadas pela simulação e pela dosimetria citogenética.....	91
Tabela 5 -	Aplicação da distribuição de Poisson ao número de passageiros presentes na estação do metrô da Carioca.....	97
Tabela 6 -	Concentrações no ar do Cs-137	102

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 -	Atividade de fonte radioativa.....	67
Equação 2 -	Taxa de exposição.....	68
Equação 3 -	Dose absorvida.....	68
Equação 4 -	Dose equivalente.....	69
Equação 5 -	Taxa de exposição com blindagem.....	70
Equação 6 -	Dispersão da pluma radioativa.....	72
Equação 7 -	Dose efetiva a partir da inalação de radionuclídeos.....	73
Equação 8 -	Traslação 2D do sistema XOY para X'O'Y'.....	74
Equação 9 -	Traslação 2D do sistema X'O'Y' para XOY.....	74
Equação 10 -	Rotação 2D do sistema XOY para X'O'Y'.....	75
Equação 11 -	Rotação 2D do sistema X'O'Y' para XOY.....	75
Equação 12 -	Traslação 2D sob forma vetorial.....	76
Equação 13 -	Traslação 3D sob forma vetorial.....	76
Equação 14 -	Traslação 3D sob forma matricial.....	76
Equação 15 -	Rotação 3D em torno do eixo Z.....	77
Equação 16 -	Rotação 3D em torno do eixo X.....	77
Equação 17 -	Rotação 3D em torno do eixo Y.....	77
Equação 18 -	Conversão de coordenadas geodésica em coordenadas ECEF.....	80
Equação 19 -	Conversão de coordenadas ECEF para ENU.....	81
Equação 20 -	Trasformação de coordenadas do referencial topocêntrico para o referencial da pluma radioativa.....	81
Equação 21 -	Distribuição de Poisson.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARN	Autoridade de Regulamentação Nuclear da Argentina
AVSAR	Ambiente virtual de simulação de acidentes radiológicos e nucleares.
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONABIO	Comissão Nacional de Biodiversidade
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
EPA	Environmental Protection Agency
IAEA	International Atomic Energy Agency
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBTEN	Instituto Boliviano de Tecnologia Nuclear
INES	International nuclear radiological event scale
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
GUI	Graphical user interface
MMA	Ministério de Meio Ambiente
PMRA	Programa de monitoração radiológica ambiental
SIPRON	Sistema de proteção ao programa nuclear brasileiro
SBA	Sistema baseado em agentes
SIG	Sistema de informação geográfica
OO	Orientação objeto
UN	United Nations
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo geral	14
1.2	Objetivos específicos	15
1.3	Originalidade e contribuição	15
1.4	Justificativa	16
1.5	Materiais e métodos	17
2	RADIOATIVIDADE E ACIDENTES RADIOLÓGICOS E NUCLEARES	21
2.1	Radioatividade	21
2.2	Acidentes radiológicos e nucleares	24
2.3	Impacto na saúde e meio ambiente	31
3	O PARADIGMA AMBIENTAL BRASILEIRO E AS ATIVIDADES NUCLEARES	35
4	MONITORAMENTO AMBIENTAL E RADIOATIVIDADE	42
4.1	Gestão da emergência radiológica	46
5	SIMULAÇÃO DE ACIDENTES RADIOLÓGICOS	49
5.1	A representação do espaço no ambiente virtual	52
5.1.1	<u>Representação espacial nos sistemas de informação geográfica(SIG)</u>	53
5.1.2	<u>Representação espacial nos sistemas Google Maps™ e Google Earth™</u> ...	56
5.2	As características dos sistemas baseados em agentes (SBA)	57
5.3	Integrando sistemas baseados em agentes (SBA) com sistemas de informação geográfica (SIG) ou representações espaciais equivalentes	61
5.4	Modelo proposto para o ambiente virtual	66
5.4.1	<u>Descrição do modelo matemático</u>	67
5.4.2	<u>Modelo matemático de dispersão de pluma</u>	71
6	RESULTADOS	82
6.1	A construção de um ambiente virtual para a simulação de acidentes radiológicos e nucleares (AVSAR)	82
6.2	Exemplos de simulação de acidentes radiológicos e nucleares, estudos de caso e validação do modelo proposto	86
6.2.1	<u>Acidente radiológico hipotético - caso geral - tipo e intensidade da fonte radioativa a serem definidos</u>	86
6.2.2	<u>Acidente radiológico real - Cochabamba - Bolívia, 2002</u>	88
6.2.3	<u>Acidente radiológico hipotético - estação de Metrô Carioca, Rio de Janeiro</u>	92
6.2.4	<u>Simulação de pluma radioativa na usina de nuclear de Angra dos Reis, Rio de Janeiro</u>	99
7	CONCLUSÕES, SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES	104
	REFERÊNCIAS	105
	APÊNDICE	112

1 INTRODUÇÃO

O aumento do uso de equipamentos, que utilizam fontes radioativas, em diversos setores da sociedade (indústrias, hospitais, clínicas médicas e odontológicas, geração de energia, conservação de alimentos, esterilização de produtos, aviação, extração petrolífera) gerou a necessidade de um maior controle nacional e internacional da exposição radioativa.

O Comitê das Nações Unidas para os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) é o organismo científico da ONU encarregado de gerar relatórios dos níveis de radiação e dos efeitos causados pela exposição à radiação ionizante. A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) é o órgão da ONU encarregado de definir e difundir os padrões de proteção e segurança para a radiação ionizante e garantir o uso pacífico das atividades nucleares. Muitos países possuem órgãos encarregados de fiscalizar o uso da radiação, prevenir acidentes radiológicos e seu impacto na sociedade. No Brasil, estas atribuições estão a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Toda esta estrutura é necessária em decorrência da magnitude e dos riscos envolvidos em possíveis acidentes radiológicos e nucleares. No Brasil, viveu-se uma situação de grande impacto, quando do acidente radiológico de Goiânia, em setembro de 1987. Neste evento, uma fonte de Césio-137 (Atividade: 50,8 TBq / 1.375 Ci; meia-vida de 30 anos), utilizada em equipamentos de radioterapia, foi dispersada acidentalmente junto à população, o que provocou, além da monitoração de áreas urbanas (2.000 Km), a contaminação (interna ou externa) de 249 pessoas, internação hospitalar de 20 pessoas e a morte de 4 pessoas (3 adultos e 1 criança) (IAEA,1988).

As medidas defensivas e ações de emergência envolveram 575 profissionais durante 6 meses; a retirada de 200 habitantes de 41 casas, o monitoramento de 159 casas, o trabalho de descontaminação de 42 casas, a demolição de 7 casas e o armazenamento de 3.500m³ de rejeitos. Além dos efeitos psicológicos negativos, que traumatizaram a população por vários anos, foram impetrados vários processos judiciais custosos para a União (IAEA,1988).

Isto implica concluir que o planejamento de respostas imediatas e de ações de emergências é fator crítico para estabelecer políticas de segurança. Modelos de

simulação, utilizando a tecnologia de agentes, são ferramentas que podem ser empregadas com sucesso nesses casos. Elas podem representar o “mundo real” e a interação de pessoas, materiais e fontes radioativas. A construção desses modelos de simulação permitiriam o estudo prévio e mais detalhado dos ambientes envolvidos e das possíveis repercussões junto ao público em geral.

Em geral, para se estimar as doses a que as pessoas expostas foram submetidas empregam-se as seguintes alternativas: i) realiza-se a reprodução do acidente com a utilização de modelos (*fantomas*) que representam o corpo humano; ii) efetua-se a análise de sangue das pessoas contaminadas, quando estas podem ser localizadas; iii) efetua-se as medições dos dosímetros que estavam sendo utilizados por pessoal técnico; iv) realiza-se cálculo matemático. Pode-se observar a limitação de alguns destes procedimentos, pois, ao reproduzir o acidente, necessita-se o uso de fontes radioativas reais; e para a análise hematológica, é necessária a presença das pessoas, possivelmente, contaminadas. Ademais, há que se observar de todo o impacto social e psicológico que tais reproduções podem vir a provocar. A simulação, através de *software*, permite diminuir estas dificuldades, bem como, cria um ambiente controlado para a realização dos experimentos.

1.1 Objetivo geral

Esta tese explora o uso de ambientes virtuais para a simulação de processos críticos, no caso de acidentes radiológicos. Em um ambiente virtual, tipicamente computacional, representativo de um ambiente real, em que se acham presentes entidades virtuais, também representativas de entidades reais, os usuários poderão interagir com o ambiente e simular fenômenos ou processos que seriam difíceis de reproduzir no mundo real, devido a questões de segurança ou de custo elevado. A proposta desta tese é, pois, integrar representações georeferenciadas do espaço e modelos baseados em agentes autônomos, com o objetivo de construir ambientes virtuais que tenham a capacidade de simular acidentes radiológicos.

1.2 Objetivos específicos

O ambiente virtual apresentado nesta tese permite a simulação de acidentes radiológicos e também pode ser empregado para a simulação de acidentes nucleares. Neste último caso será preciso fornecer como *input* à simulação, a equação que descreve a dispersão da pluma radioativa. O ambiente pode ser usado como suporte à gestão de emergência radiológica ou nuclear e também como um instrumento para treinar equipes. Com base nas informações de localização geográfica do acidente, do tipo de material radioativo envolvido e do tempo de exposição no meio ambiente, pode-se simular o acidente radiológico, avaliando-se sua magnitude, suas possíveis consequências, determinar pontos geográficos para coleta de amostras ambientais e estabelecer áreas de segurança para a população próxima ao local da ocorrência do acidente, assim como determinar medidas para acompanhamento médico. O ambiente virtual permite identificar hospitais (com suas especialidades, número de leitos etc.), escolas (número de alunos, faixa etária etc.) e outras instituições nas regiões próximas ao acidente, o que pode ser muito útil para o trabalho das equipes de emergência. No próprio ambiente virtual poderão ser incluídas informações relativas aos tratamentos emergenciais aplicáveis às diferentes doses absorvidas pelos indivíduos, sintomas observáveis e outras informações de utilidade para os profissionais que atuam na emergência radiológica.

Nesta tese será mostrado como articular um ambiente virtual, georreferenciado, com um *software* baseado em agentes que simulará os acidentes radiológicos. Os agentes terão propriedades, tais como: mobilidade, reatividade e objetividade. Pessoas e fontes radioativas serão representadas através de agentes. Desta forma, através da simulação baseada em agentes, pretende-se estudar, analisar e gerenciar esses complexos sistemas que são os acidentes radiológicos.

1.3 Originalidade e contribuição

Essa tese faz uso de tecnologias computacionais baseadas em sistemas de agentes autônomos e de sistemas de informações geográficas para construir um

ambiente virtual de simulação de acidentes radiológicos. Através de um método que integra estas duas tecnologias, pode-se escolher um espaço geográfico para situar uma fonte radioativa, distribuir pessoas que possam ser afetadas pela radioatividade, calcular a dose recebida pelas mesmas, estimar o impacto ambiental do acidente e identificar zonas de exclusão em virtude da dispersão do material radioativo. A construção de diversos cenários e a simulação sem a necessidade de material e equipamentos sofisticados permitem capacitar equipes técnicas de pessoal civil e militar para lidar com acidentes radiológicos.

Além de sua originalidade no campo dos acidentes radiológicos propriamente dito, a construção de ambientes virtuais, baseada em representações georreferenciadas do espaço, e sistemas, baseados em agentes, abrem muitas perspectivas para a simulação de processos críticos em que a realização de experimentos reais é difícil ou impossível de se realizar.

1.4 Justificativa

Acidentes radiológicos caracterizam-se pela significativa exposição à radiação de trabalhadores especializados e do público em geral. Estes acidentes normalmente ocorrem como consequência da atividade humana envolvendo substâncias radioativas em diversos setores: indústrias, hospitais e usinas de geração de energia.

A pronta detecção de um acidente radiológico e a determinação da sua possível extensão são fatores essenciais para o planejamento de respostas imediatas e ações de emergência. Os efeitos dos acidentes radiológicos sobre os seres humanos podem ser minimizados se houver um tratamento médico adequado e em tempo hábil; podem ser estabelecidas zonas de exclusão, evitando-se a contaminação ou exposição de novos indivíduos.

Quando ocorre um acidente radiológico e os indivíduos envolvidos, particularmente os trabalhadores especializados, não estão portando dosímetros, tem-se que recorrer a outros métodos para a avaliação das doses recebidas. Tradicionalmente, estes métodos podem ser: modelagem da exposição, reconstrução física da exposição ou dosimetria biológica. O primeiro método trata do uso de fantasmas matemáticos com código de Monte Carlo ou de fantasmas de voxels para representar determinadas regiões

do corpo humano e a irradiação dos mesmos para mensurar a dose recebida (LIMA et al , 2004). Já no caso do segundo método se reproduz o acidente com equipamentos de medição (por exemplo, dosímetros), fonte radioativa semelhante a que produziu o incidente e galões de água, representando o corpo humano. No terceiro método efetua-se a análise laboratorial citogenética (cromossomas) (LEMOS; AMARAL, 2011) ou de excreta (urina, fezes) (PEREIRA et al , 2005) dos indivíduos irradiados ou contaminados a fim de determinar as doses absorvidas.

Dentre as limitações do método de reconstrução física, pode-se enumerar: a construção de todo um aparato para reconstruir de modo fidedigno o acidente, os custos associados, o uso de fontes radioativas reais e, no caso da dosimetria biológica, a coleta das amostras biológicas, desde que, evidentemente, se tenha acesso aos indivíduos que sofreram a contaminação.

1.5 Materiais e métodos

A representação do espaço será feita através do *Google MapsTM* e *Google EarthTM* que são o ambiente virtual em que estarão inseridas as entidades virtuais representativas dos objetos do mundo real. Esta forma de representação de dados espaciais geográficos foi escolhida, ao invés de SIGs tradicionais, porque possui interface intuitiva e simples de trabalhar, está disponível gratuitamente na internet, permite acesso ao globo completo tridimensional com imagens de alta resolução, fornece dados de rua, imagens panorâmicas de vista da rua, imagens históricas e permite pesquisar pontos de interesse, cidades e lugares de forma bastante dinâmica.

As entidades virtuais serão abstrações computacionais, denominadas agentes autônomos (implementados em software), as quais representarão diversos tipos de atores do mundo real – desde seres animados com elevado grau de inteligência, até seres com comportamento elementar. Os agentes podem interagir uns com os outros e são programados para ser entidades pró-ativas, autônomas, dotadas de comportamento com maior ou menor grau de inteligência, e capazes de perceber o ambiente em que se acham imersos. Consegue-se, assim, um modelo espacial bastante preciso, em cima do qual os agentes, com os seus atributos e comportamentos, são posicionados

inicialmente, e, no decorrer de uma simulação temporal, interagem entre si e com o ambiente, simulando a dinâmica de processos complexos.

Em casos de acidentes radiológicos, a modelagem dosimétrica utiliza as seguintes equações¹:

- i. Taxa de exposição : $X = \Gamma.A / d^2$;
- ii. Dose absorvida : $D = X.t$;
- iii. Dose equivalente : $DE = D *FQ$.

A determinação experimental da dose (utilizando-se um simulador do corpo humano) fornece uma primeira estimativa das doses, porém não contempla os impactos sócio-ambientais, o que limita uma visão global de um acidente radiológico.

Fundamentada em uma visão holística (CASTRO; BRANQUINHO, 2003) , a modelagem proposta nessa tese baseia-se em simulações através de modelos computacionais (BANKS, 1998) que permitem, com maior facilidade, a predição do comportamento de sistemas reais sob as mais variadas condições, o que fornece uma compreensão mais aprofundada da estrutura de sistemas complexos. Esta abordagem permite incorporar diversas vantagens de se trabalhar com modelos e simulações, dentre elas, não trabalhar diretamente com o mundo real, o que poderia acarretar custos elevados, procedimentos onerosos e procedimentos muito difíceis de serem realizados (no caso proposto, contaminação ambiental por material radioativo). Outra vantagem observada é que as simulações podem ser repetidas *ad nauseam* e são não destrutivas, não interferindo no mundo real.

Em geral, os usuários podem interagir com o ambiente virtual e simular fenômenos ou processos que seriam impossíveis de se reproduzir no mundo real, devido a questões de segurança ou de custo excessivo. Por esta razão os ambientes virtuais são ferramentas ideais para a simulação de determinados processos críticos (como os acidentes radiológicos).

Já a reconstrução física da exposição envolve a reprodução das condições em que o acidente ocorreu, a utilização de *phantoms* (fantomas), para simular os indivíduos envolvidos, o uso de fontes radioativas reais e de dosímetros. Dentre as limitações deste método pode-se enumerar a construção de todo um aparato para reconstruir de modo fidedigno o acidente, os custos associados, bem como o uso de fontes radioativas reais.

¹ Equações descritas no item 5.4.1 Descrição do modelo matemático

Por ambiente entende-se: i) o conjunto de circunstâncias, objetos ou condições que envolvem uma determinada entidade; ii) o complexo de fatores físicos, químicos e bióticos (como clima, solo, seres vivos) que agem sobre um organismo ou uma comunidade ecológica e, por fim, determinam a sua forma e sobrevivência.

Um ambiente virtual seria, então, um ambiente, tipicamente computacional, representativo de um ambiente real, e em que se acham presentes entidades virtuais, também representativas de entidades reais (Figura 1). Normalmente o ambiente real seria o espaço tridimensional e as entidades reais, objetos, pessoas ou animais que interagem entre si e com o meio ambiente (MAGUIREIRE; BATTY; GOODCHILD, 2005). As entidades virtuais seriam abstrações computacionais das entidades reais (SILVA; FARIAS, 2007).

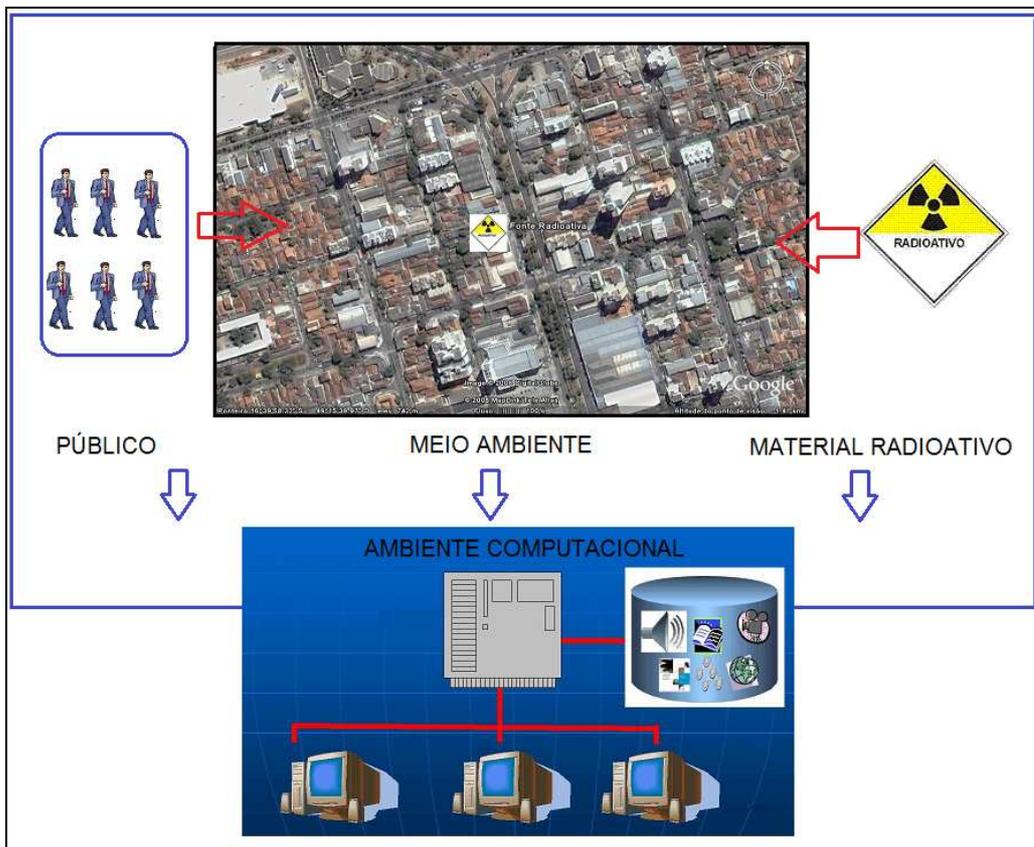


Figura 1 - Modelo de simulação

Para alcançar o objetivo exposto, esta tese foi dividida em 7 capítulos: o capítulo 1, Introdução, inicia o tema a ser tratado na tese; o objetivo geral e os objetivos específicos; a originalidade da tese e sua contribuição; a justificativa para o estudo e os materiais e métodos utilizados. O capítulo 2 aborda os conceitos de radioatividade e de

acidentes radiológicos e nucleares, bem como o impacto na saúde e no meio ambiente, por conta destes acidentes. O capítulo 3 elenca a legislação ambiental brasileira e, em particular, foca nas atividades nucleares. O capítulo 4 enfoca os conceitos de monitoramento ambiental e de técnicas utilizadas para a gestão de emergências radiológicas. O capítulo 5 trata especificamente da arquitetura do ambiente virtual que foi criado e os conhecimentos da área computacional e de radioproteção que fundamentaram a sua construção. O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos com o uso do ambiente virtual criado (AVSAR), exemplificando, através de casos hipotéticos e reais, e o modelo matemático que embasará a simulação. No último capítulo (7), elenca-se as conclusões, frutos desta tese e discorre-se sobre os desdobramentos desta tese, em termos de trabalhos futuros.

2 RADIOATIVIDADE E ACIDENTES RADIOLÓGICOS E NUCLEARES

2.1 Radioatividade

Radioatividade é a emissão espontânea de radiação, ou diretamente a partir de um núcleo atômico instável, ou como consequência de reações nucleares. A radiação emitida pelas substâncias radioativas compreende as partículas alfa (α), as partículas beta (β) e os raios gama (γ). Na natureza, existe a radiação de fundo, que é a radiação a que todos estão submetidos e que varia de região para região. Normalmente ela é muito baixa e não afeta a saúde do ser humano.

A radioatividade natural foi descoberta por Becquerel, em 1896, através do estudo da fluorescência do mineral Urânio. Ele observou que estes minerais eram capazes de escurecer placas fotográficas, que ainda não haviam sido submetidas à luz. Este fato levou Becquerel a sugerir que o mineral Urânio emitia um tipo de radiação capaz de penetrar através de camadas de papel e ainda sensibilizar placas fotográficas virgens. Depois, o casal Curie através de novas experiências, em 1898, denominou esta forma de energia de radioatividade (TAUHATA et al, 2002).

As radiações foram, a partir destes experimentos, classificadas em alfa (α), beta (β) e gama (γ). A radiação alfa (α) possui baixo poder de penetração e alto poder de ionização (capacidade de formar um par de íons: negativo, elétron livre, e positivo, átomo sem um de seus elétrons ; possui energia elevada para arrancar os elétrons de seus orbitais). A radiação beta (β) possui maior poder de penetração do que a alfa (α) e menor poder de ionização. A radiação gama (γ), que é uma onda eletromagnética, possui muito poder de penetração e pouco poder de ionização.

Pode-se dizer que as radiações são produzidas por processos de ajustes que ocorrem no núcleo do átomo, ou em suas camadas eletrônicas, ou pela interação de outras radiações ou partículas com o núcleo, ou com a camada eletrônica (TAUHATA et al, 2002).

“A radiação ionizante representa ondas eletromagnéticas e partículas que podem ionizar, isto é, remover um elétron de um átomo ou molécula do meio pelo qual eles se propagam. A radiação ionizante pode ser emitida no processo de decaimento natural de

alguns núcleos instáveis ou pela excitação de átomos e seus núcleos em reatores nucleares, ciclotrons, máquinas de raios-X ou outro instrumento”. (UNITED NATIONS, 2000).

“A radiação alfa (α) é emitida quando núcleos instáveis e pesados, por exemplo, urânio, rádio, radônio ou plutônio, sofrem decaimento. A partícula alfa é um núcleo de hélio formado por dois prótons e dois nêutrons. É cerca de 8.000 vezes mais pesada que um elétron e tem o dobro de sua carga elétrica. Uma vez emitidas, elas se deslocam relativamente devagar (aproximadamente 1/20 da velocidade da luz), em virtude de sua carga elétrica e grande massa. Partículas alfas são facilmente ionizadas e param rapidamente quando penetram em um material. A distância que elas se deslocam no ar é de poucos centímetros. Em materiais sólidos a distância é somente de poucos centésimos de milímetros. Se a radiação alfa atinge o corpo humano desprotegido, ela não consegue ultrapassar a camada de células mortas da pele, não causando, assim, danos. Uma substância que emite radiação alfa somente causará dano ao corpo humano se for inalada ou ingerida. Nestes casos, a radiação pode atingir células vivas e causar muito prejuízo.” (KOSE VALD, 2012).

“A radiação beta (β) é emitida durante o decaimento radioativo de núcleos com excesso de nêutrons em relação a prótons. Exemplos de beta-emissores puros são os radionuclídeos Estrôncio-90 com meia vida de 27,7 anos e Trítio com 12,3 anos de meia vida. A partícula beta, que é um elétron, é emitida quando um nêutron em um núcleo é transformado em próton. A partícula beta é muito leve. Sua massa é cerca de 1/2.000 da do próton. As partículas betas se ionizam com menos facilidade que as partículas pesadas e, portanto, elas possuem muito mais alcance. O caminho que percorrem é deformado. Seu alcance no ar pode ser de vários metros. Em tecido ou água, seu alcance é de vários milímetros. Óculos ou roupa grossa costumam ser suficientes para deter a radiação beta. A pele desprotegida exposta a uma intensa radiação beta pode queimar, como resultado de uma dose elevada sobre a pele. O grande risco associado aos emissores de radiação beta (β) ocorre na ingestão de alimentos ou na inalação de substâncias que contenham esta radiação” (KOSE VALD, 2012).

Os raios gama (γ) são um conjunto de fótons eletromagnéticos. Os fótons gama são os fótons mais energizados no espectro eletromagnético. Eles são emitidos a partir do núcleo de átomos instáveis. Eles não possuem massa e nenhuma carga elétrica – eles

são energia eletromagnética pura. A radiação gama é um tipo de radiação ionizante, com elevada quantidade de energia. Os fótons gama têm 10.000 vezes mais energia do que os fótons na escala visível do espectro eletromagnético. Apesar dos raios gama e dos raios-X apresentarem o mesmo risco, eles diferem em sua origem. Os raios gama se originam no núcleo, enquanto os raios-X se originam nos campos elétricos que envolvem o núcleo.

A emissão de radiação gama (γ) ocorre quando o núcleo de um átomo radioativo possui muita energia e, ao buscar uma estabilização, emite esse excesso de energia em forma de onda eletromagnética.

Os fótons gama, por serem uma onda eletromagnética, se deslocam na velocidade da luz e percorrem centenas de milhares de metros no ar antes de perder sua energia. Eles podem atravessar muitos tipos de materiais, incluindo o tecido humano. Materiais muito densos, como o chumbo, são comumente usados como blindagem para deter os fótons gama.

Os raios gama (γ) existem enquanto tiverem energia. Uma vez que sua energia seja dissipada, no ar ou em um material sólido, eles cessam de existir. O mesmo acontece com os raios-X. Por causa do poder de penetração dos raios gama (γ), e sua capacidade de se deslocar a grandes distâncias, ele é considerado como o principal fator de risco para a população em caso de acidente radiológico.

“O processo de ionização em matéria viva necessariamente altera átomos e moléculas, ao menos temporariamente, e pode provocar danos às células. Se o dano celular ocorre e não é adequadamente reparado, isto pode impedir que a célula sobreviva ou impedir que desempenhe suas funções normais. Uma outra situação é que isto pode resultar, também, em uma célula viável, mas modificada.” (UNITED NATIONS, 2000).

A grandeza usada para expressar a exposição de um material à radiação, por exemplo, o corpo humano, é a dose absorvida, cuja unidade é o gray (Gy). No entanto, os efeitos biológicos por unidade da dose absorvida variam com o tipo de radiação e a parte do corpo que foi exposta. Para se levar em conta estas variações, uma grandeza definida como dose equivalente é usada e sua unidade é sievert (Sv).

Para a avaliação da dose recebida por indivíduos é preciso levar em consideração a atividade da fonte radioativa, o seu ponto de localização, a existência de

objetos entre a fonte e os indivíduos (blindagem) e o tempo de exposição do indivíduo, nos casos em que houve irradiação externa.

Existem duas formas pelas quais os seres humanos podem ser expostos à radiação – e elas podem ocorrer simultaneamente. A fonte de radiação pode estar totalmente fora do corpo – e é então chamada de radiação externa. Aqui a radiação atinge o indivíduo e é absorvida, dependendo de suas características físicas. A energia será absorvida, mas a pessoa não se torna radioativa (Figura 2).

Na outra forma, a radiação pode se depositar na pele. Este material radioativo pode entrar no corpo através do ar, ser inalado ou ingerido, produzindo o que é chamado de radiação interna ou contaminação radioativa.

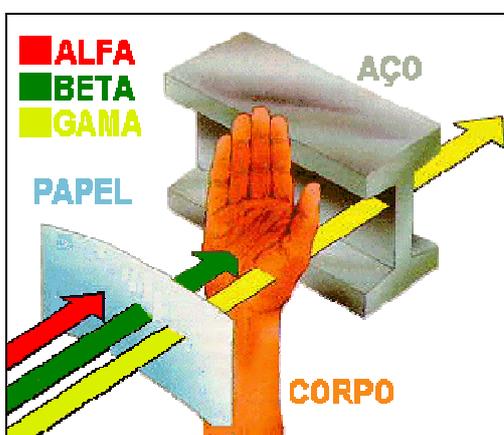


Figura 2 - Blindagem das radiações
Fonte: AZEVEDO, 2010

2.2 Acidentes radiológicos e nucleares

Acidentes radiológicos e nucleares são acidentes caracterizados pela existência de campos intensos, intencionais ou não, de radiação não controlada, liberada no ambiente por uma quantidade de material radioativo e que envolvem a exposição ou contaminação de seres humanos e/ou do ambiente, sendo capazes de causar sérios prejuízos ou morte (Figura 3).



Figura 3 - Acidente radiológico

Fonte: IAEA, 1988

Os acidentes radiológicos normalmente enquadram-se no nível 4 (aqueles com consequências locais) da Escala Internacional de Eventos Nucleares e Radiológicos (INES) (IAEA, 2008) e, a princípio, devido às suas características, podem ocorrer em qualquer lugar. De modo geral, estes acidentes devem-se a:

- i) fontes radioativas potencialmente perigosas e não controladas (abandonadas, perdidas, roubadas ou encontradas);
- ii) uso inadequado de fontes potencialmente perigosas utilizadas nas áreas médica ou industrial (ex.: as usadas em radiografia);
- iii) exposição e contaminação do público por fontes radioativas de origem desconhecida;
- iv) reentrada na atmosfera de satélites contendo material radioativo;
- v) super-exposições graves;
- vi) atos terroristas;
- vii) transporte de fontes radioativas em que ocorre acidentes.

No mundo existem 433 usinas nucleares de geração de energia em funcionamento, outras 63 usinas em construção e 160 em planejamento para serem construídas (WNA, 2012). Só este montante corrobora a necessidade de um efetivo monitoramento e a instituição de normas de segurança e proteção radiológicas

eficientes. Uma análise do Brasil evidencia que, embora existam apenas 2 usinas nucleares em funcionamento, a quantidade de instalações radiativas chegam ao total 3.724, sendo 1.355 instalações industriais, 1.300 serviços médicos, 744 instalações de pesquisa e outras 325 diversas instalações. Ao todo no Brasil se têm 144 mil indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) e um total de 90 mil equipamentos com algum tipo de material radioativo. Esses números são por si só bastante expressivos e evidenciam a possibilidade de ocorrência de um acidente ou sobreexposição (DA SILVA, 2012).

Embora acidentes graves e recentes ocorridos em usinas nucleares (Fukushima) (WINIAREK et al, 2011) ainda se encontrem presentes na memória recente da humanidade, as grandes preocupações atuais se concentram em ataques terroristas com a utilização de material radioativo. Em 1998 o NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements dos EUA) formou um comitê científico e o encarregou da tarefa de prover um relatório sobre o uso potencial de radiação e radioatividade em atos terroristas. Em consequência, se deu a consolidação, a partir deste marcador temporal, de estratégias mundiais para (NCRP, 2004):

- i) desenvolver novas tecnologias de detecção de radioatividade;
- ii) desenvolver agentes terapêuticos para mitigar o efeito da radiação na saúde;
- iii) diminuir o impacto psicológico na população de eventos terroristas;
- iv) emprego de novos recursos para descontaminação de áreas afetadas pela radioatividade.

O aumento do uso de equipamentos que usam fontes radioativas em diversos setores da atividade humana (Figura 4) traz, como contrapartida, a possibilidade da ocorrência de acidentes radiológicos. Mesmo com os esforços adotados pela IAEA para definir e difundir padrões de proteção e segurança, diversos fatores como a imprudência, a negligência, a imperícia humana; acidentes em transporte e eventos naturais, podem levar ao acontecimento de acidentes radiológicos, como se pode constatar nos inúmeros acidentes reportados na base de dados compilados por Wm. Robert Johnston (JOHNSTON, 2011). Evidentemente que não se tem conhecimento do número de acidentes não reportados, nem de suas consequências. Neste exato momento, aparelhos mal calibrados podem estar expondo com doses elevadas pessoas e causando danos irreparáveis à saúde.

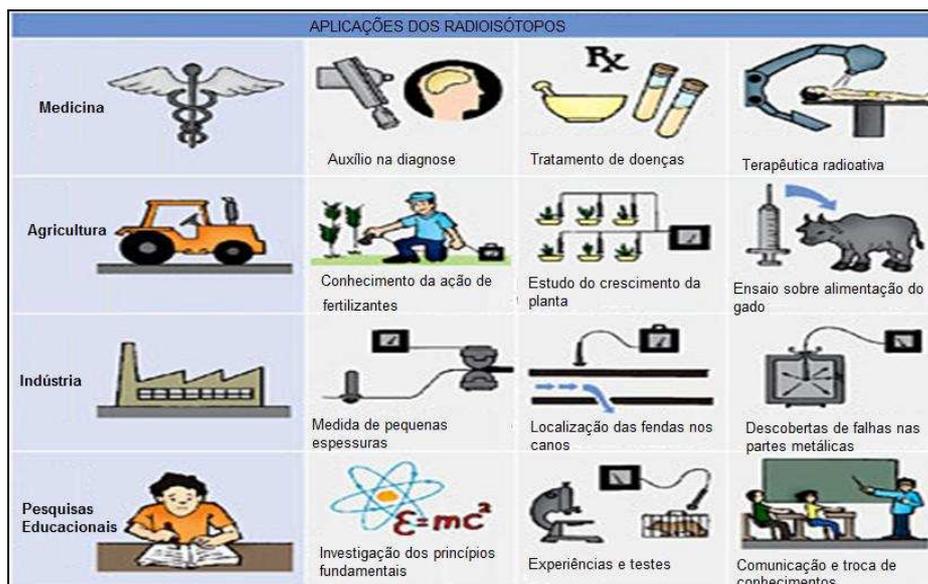


Figura 4 - Aplicações dos radioisótopos

Fonte: AZEVEDO, 2010

Os acidentes radioativos, de maior gravidade, são classificados nos níveis 4, 5, 6 e 7 da Escala Internacional de Eventos Nucleares e Radiológicos (INES) (IAEA, 2008) dependendo da situação *in-site* e *off-site*. Os acidentes nucleares podem ocorrer em:

- i) instalações onde existam intensas irradiações (ex.: irradiadores industriais);
- ii) reatores nucleares (para geração de energia, para pesquisa ou para a propulsão de navios);
- iii) instalações para armazenamento de grandes quantidades de combustível irradiado e de material radioativo líquido ou gasoso;
- iv) instalações de processamento de combustível;
- v) instalações industriais (ex.: manufatura de produtos rádio-fármacos);
- vi) instalações médicas ou de pesquisa com fontes intensas (ex.: teleterapia).

Pelas suas características próprias, intensidade e extensão dos danos causados, os acidentes nucleares são facilmente localizados e identificados, mas, devido à sua magnitude, os seus efeitos são muito mais nocivos e duradouros para os seres humanos e o meio ambiente, podendo afetar a vida até muitos quilômetros além do epicentro do evento, como se pode constatar nos acidentes de Chernobyl (YABLOKOV et al , 2009) e Fukushima (WINIAREK et al , 2011).

No entanto, em virtude de acidentes, pode-se ficar exposto à radiação não natural que se origina de exposição por tratamento médico, partículas liberadas (*fallout*) por causa de testes ou acidentes nucleares, geração de energia e acidentes radioativos

propriamente ditos. A fim de prevenir estes acidentes são sistematizados procedimentos de segurança que configuram a radioproteção. Esta se constitui na ciência que trata dos efeitos das radiações ionizantes sobre seres vivos e da proteção do pessoal contra os efeitos nocivos destas radiações. É necessária, então, a realização de ações urgentes para diminuir os possíveis efeitos da radiação. Em primeiro lugar, precisa-se identificar a quantidade de pessoas contaminadas, grau ou dose de radiação recebida e um mapa mais elaborado (informações georeferenciadas) das áreas atingidas (AGAPOV et al, 2005). Se se souber com antecedência a magnitude do acidente radiológico, pode-se evitar alarmar a população desnecessariamente, o que poderia se configurar em uma resposta inadequada ao evento, potencialmente causando um dano psicológico e social muito maior do que o acidente propriamente dito.

Um acidente pode comprometer os serviços de transporte, gerar zonas de exclusão nas áreas ou locais contaminados, levando ao deslocamento de pessoas, comprometer o abastecimento de água, e superlotar os serviços hospitalares, causando sérios problemas sociais (AGAPOV et al, 2005). Basicamente acidentes podem ser reduzidos através de adoção de medidas de radioproteção (por exemplo, o operador usar um medidor de radiação para confirmar que a fonte está encapsulada) (DA SILVA, HUNT et al, 2003).

Situações de emergências podem ocorrer em uma instalação radiativa ou nuclear a qualquer momento, mesmo com as melhores medidas preventivas em vigor. A experiência mostra que, mesmo situações de emergência em instalações relativamente pequenas, podem ter um grave impacto social, econômico e psicológico nacional e internacional. A fim de minimizar esses impactos, a ação efetiva do grupo de emergência e uma estreita coordenação com as autoridades locais e nacionais são essenciais. Esta resposta à emergência radioativa ou nuclear pode incluir serviços médico-hospitalares, defesa civil, bombeiros e forças militares. Poucas horas depois do evento, as autoridades nacionais podem também ter um papel importante a desempenhar no apoio à resposta a nível local. Tendo em vista que emergências radioativas/nucleares são raras, grupos de emergência locais têm pouca ou nenhuma experiência em lidar com este tipo de emergência e a inexperiência muitas vezes leva à uma resposta inadequada.

Ao analisar os acidentes em potencial consegue-se uma maior precisão na elaboração de um plano de emergência. Através desta análise define-se, também, o grau de criticidade do acidente e sua extensão; identifica-se os possíveis radionuclídeos

presentes para a realização do monitoramento ambiental. Reforça-se aqui a importância do uso de ferramentas de simulação virtual (computacional) para a definição de cenários que permitirão um apoio para o planejamento de resposta às emergências radioativas/nucleares.

A IAEA criou em 1990, com apoio dos seus países membros, a Escala INES (International Nuclear and Radiological Event Scale). Ela é uma ferramenta mundial para a comunicação ao público quando da ocorrência de um evento nuclear e radiológico. Assim como informações sobre terremotos ou de temperatura seriam difíceis de se compreender sem as escalas Richter ou Celsius, a escala INES explica o significado dos acontecimentos (incidentes, acidentes e anomalias) de uma série de atividades, que englobam o uso de fontes radioativas no âmbito industrial, medicinal, em instalações nucleares e no transporte de material radioativo. Seus eventos são classificados na escala de sete níveis: Níveis 1-3 são chamados "incidentes" e Níveis 4-7 "acidentes". A escala é projetada de modo que a gravidade de um evento é de cerca de dez vezes maior para cada aumento de nível na escala. Eventos sem significado para a segurança são chamados de "desvios" e são classificados abaixo da escala / Nível 0.

Cada um de seus níveis é classificado da seguinte forma (IAEA, 2008):

- Nível 7 é classificado com acidente máximo;
- Nível 6 é classificado como acidente sério;
- Nível 5 é classificado como acidente com consequências maiores;
- Nível 4 é classificado como acidente com consequências locais;
- Nível 3 é classificado como incidente sério;
- Nível 2 é classificado incidente;
- Nível 1 é classificado como anomalia;

Alguns exemplos, que evidenciam os graves efeitos de acidentes e sua correspondente classificação na escala INES (Figura 5):

- Three Mile Island, USA, 1979: usina nuclear, reator de 800 MW de potência, 30 mil pessoas monitoradas, gases nobres na atmosfera em pequena quantidade; escala 5 INES.
- Chernobyl, Russia, 1986: usina nuclear, reator 1 GW de potência, dispersão de ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , gases nobres, 116 mil pessoas evacuadas, 81 óbitos, 7 milhões de contaminados; escala 7 INES.

- Goiânia, Brasil, 1987: equipamento de radioterapia, dispersão de ^{137}Cs , 4 óbitos, 112 mil pessoas monitoradas por cerca 600 técnicos da CNEN durante 6 meses; escala 5 INES.
- Fukushima, Japão, 2011: usina nuclear; dispersão de ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , 190 mil pessoas monitoradas, escala 7 INES.

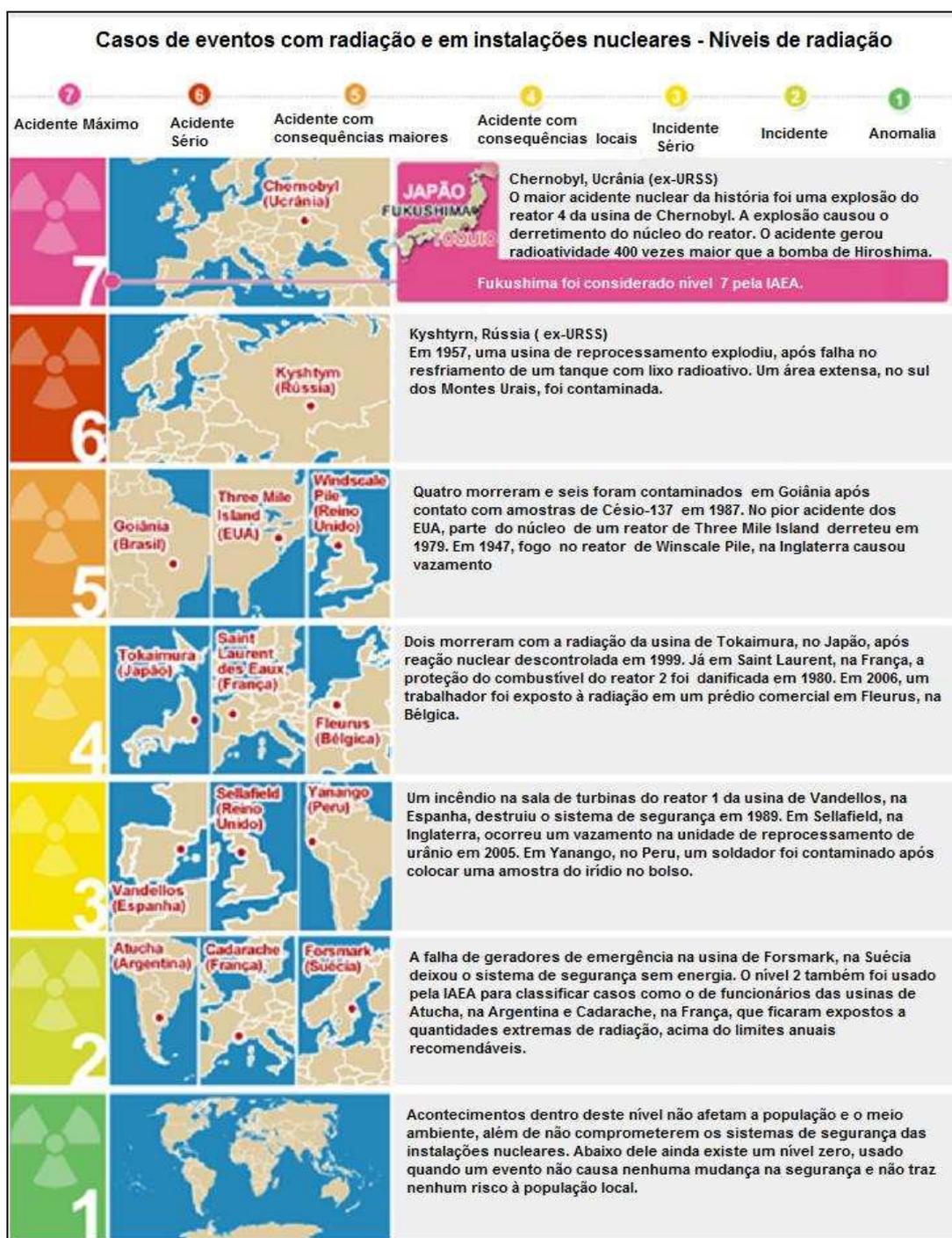


Figura 5 - Escala INES
Fonte: IAEA, 2008

A escala INES contempla, também, incidentes radioativos de menor gravidade. Estes incidentes podem ocorrer em decorrência de erros no uso de equipamentos industriais, no uso de equipamentos radiológicos, nos procedimentos de laboratórios de pesquisa etc.

Outro cenário que se apresenta, no contexto de incidentes, é o de perda ou roubo de material radioativo. A partir de um levantamento, feito em 2005 pela IAEA (IAEA, 2005), percebeu-se um aumento de eventos dessa natureza, a não recuperação das fontes e, principalmente, que essas fontes eram de césio e cobalto. Estes dados provocam preocupação, porque estes materiais radioativos poderão ser dispersos em regiões de grande densidade urbana, em estações de tratamento de água e em meios de transporte coletivos (por exemplo, trem e/ou metrô).

2.3 Impactos na saúde e no meio ambiente

Apesar de todos os benefícios do uso da radioatividade no tratamento de doenças, na prevenção de acidentes industriais, na conservação de alimentos e na geração de energia, o seu uso, quando da ocorrência de acidentes ou incidentes, traz desvantagens.

A liberação acidental de radionuclídeos no meio ambiente causa a contaminação de áreas geográficas e de pessoas. A dispersão do material radioativo na atmosfera é capaz de atingir cidades, populações e zonas rurais, onde rios, vegetais, frutas e animais serão contaminados. Pessoas podem ser obrigadas a evacuar áreas como forma de proteção, habitações podem ser destruídas, alimentos e água podem ter o seu uso restringido e sequelas podem se manifestar sob forma de câncer, tempos depois.

A população, em geral, já está exposta à radiação natural: a radiação de origem natural é aquela que é produto de substâncias que existem dentro da Terra e dentro do corpo humano (família Urânio 238 [U-238], Tório 232 [Th-232] e Potássio 40 [K-40]). Um outro exemplo de exposição natural ao que os seres humanos estão sujeitos é causado pelo gás radônio, que emana do solo e pode estar concentrado nas habitações (UNITED NATIONS, 2000).

Os efeitos da radiação são causados pelo danos inflingidos às células pelas radiações ionizantes. Os danos podem resultar em morte celular ou modificações que

podem afetar o funcionamento normal de órgãos e tecidos. A maior parte dos órgãos e tecidos não são afetados pela perda de células. Entretanto, se o número de perdas for muito grande, se poderá observar um prejuízo ao órgão ou ao tecido e, conseqüentemente, ao indivíduo. Este efeito só ocorre se a dose absorvida de radiação for suficientemente grande para matar um grande número de células. Este tipo de prejuízo ocorre em todos os indivíduos que recebem uma dose de gravidade tal que exceda o limite tolerável e seu efeito é denominado “determinístico” .

Se a célula não morre, mas é apenas modificada pela radiação, o dano na célula é geralmente reparado. Se a correção não for perfeita, a modificação será transmitida para as células filhas e poderá gerar câncer no tecido ou no órgão que foi exposto à radiação. Se as células afetadas são as que transmitem informações genéticas para os descendentes, distúrbios hereditários poderão surgir. Tais efeitos nos indivíduos ou em seus descendentes são chamados de “estocásticos”, que significam de natureza aleatória.

Os principais sintomas a que estão sujeitos o ser humano por superexposição da radiação são definidos pela síndrome de irradiação aguda (Figura 6) e são apresentados a seguir, em ordem crescente de gravidade (TAUHATA et al, 2002):

1. Anorexia (perda de apetite);
2. Náusea;
3. Vômito;
4. Debilidade e fadiga;
5. Prostração;
6. Diarréia;
7. Conjuntivite;
8. Eritema (vermelhidão cutânea);
9. Choque (falência aguda da circulação periférica);
10. Oligúria (redução da excreção urinária);
11. Ataxia (perda da coordenação dos movimentos);
12. Desorientação;
13. Coma;
14. Morte;

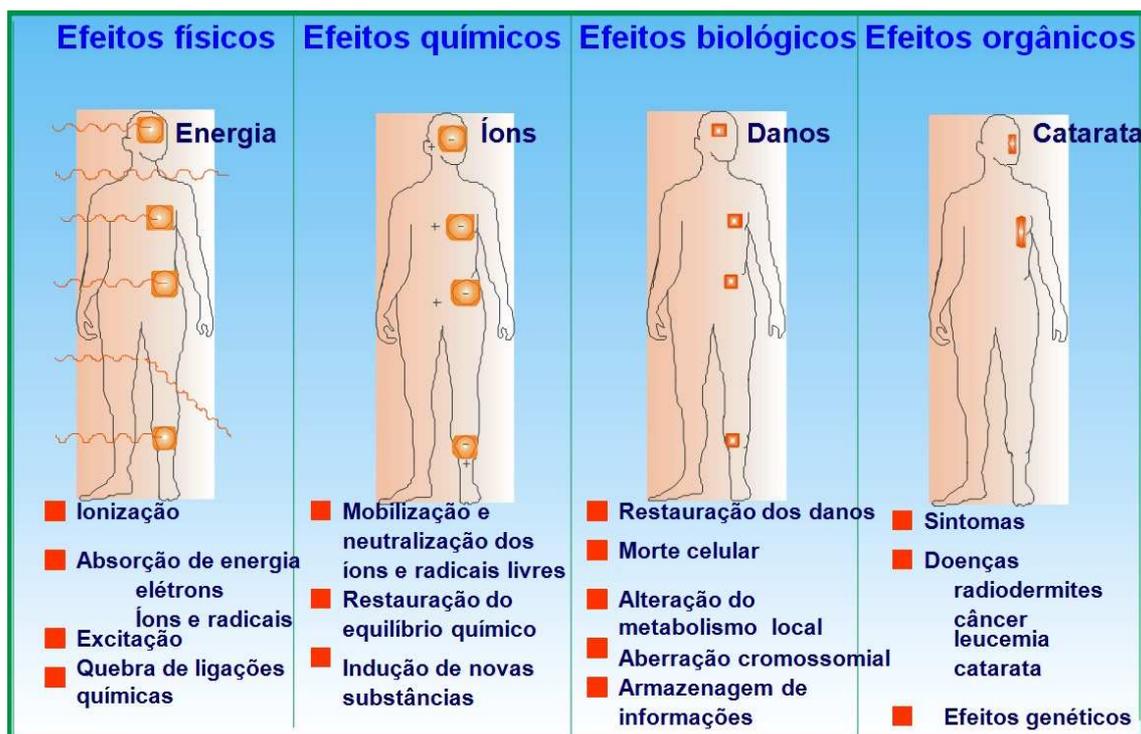


Figura 6 - Efeitos da radiação
 Fonte: TAUHATA et al, 2002

Portanto, os altos prejuízos que a contaminação radioativa pode ocasionar, quando ocorre um evento de acidente ou incidente, implicam procedimentos de segurança muito específicos que, se não cumpridos, podem causar danos graves à população e ao meio ambiente, afetando-os por gerações. Para tornar mais complexa esta situação, os rejeitos radioativos (lixo atômico) produzido nas usinas podem durar dezenas de milhares de anos (COM CIÊNCIA, 2000), sendo necessárias políticas de longo prazo para equacionar todos os problemas daí decorrentes.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estabeleceu Normas para limites de doses anuais para os trabalhadores expostos e para o público em geral. Na Tabela 1 pode-se visualizar estes parâmetros estabelecidos, que são uma importante fonte de informação para a prevenção de acidentes radiológicos e nucleares e de seus efeitos na saúde humana (CNEN, 2011).

Tabela 1- Limites de doses anuais
 Fonte: TAUHATA et al, 2002

Limite	Valor (mSv/ano)	Observações
Radiação natural	2,4	Média anual. Ref.: UNSCEAR 2008
Aplicações médicas (excluindo radioterapia)	0,03 a 2,0	Média anual. Ref.: UNSCEAR 2008
Limite anual para público em situação operacional normal	10	Dose acima da radiação natural. Não inclui aplicações médicas. Ref.: Norma CNEN NN- 3.01/07
Limite Anual para indivíduo ocupacionalmente exposto (trabalhador)	20	Média em 5 anos. Não pode exceder 50mSv em um único ano. Ref.: Norma CNEN NN- 3.01
Nível de ação para evacuação de população em situações de emergência.	50	Dose a ser evitada. Monitoração no local: Taxa: 1mSv/h . Ref.: Norma CNEN NN- 3.01 PR006
Limite de dose em situações de emergência para executar ações para prevenir o desenvolvimento de situações catastróficas.	100	Com exceção das ações para salvar vidas. Ref.: Norma CNEN NN- 3.01
Referência para aparecimento de efeitos observáveis.	1.000	Astenia, náuseas, vômitos.
Dose de corpo inteiro mais alta recebida por uma das vítimas do acidente em Goiânia.	8.000	A vítima faleceu.

Dessa forma, é necessário fazer uso de equipamentos, ferramentas e adotar padrões de segurança que permitam evitar ou diminuir os efeitos da radiação na população, avaliar as consequências dessa exposição, aplicar tratamento hospitalar adequado e adotar medidas de proteção do público e do meio-ambiente (IAEA, 1996).

3 O PARADIGMA AMBIENTAL BRASILEIRO E AS ATIVIDADES NUCLEARES

A sociedade passa por uma crise de percepção do mundo. Paradigmas e modelos antes intocáveis começam a demandar uma nova abordagem científica. Existe a necessidade de mudanças profundas das ideias, das instituições e dos valores, a fim de se alcançar, pela visão científica, uma nova maneira de entender a vida. A lógica do pensamento newtoniano-cartesiano tem levado o indivíduo a ver a realidade do mundo como uma máquina (lógica mecanicista) que não se encaixa nos desafios socioambientais que ora se apresentam. Faz-se necessária, a construção ou a reconstrução de uma ciência, com uma abordagem mais abrangente, para apoiar uma nova maneira de pensar (CAPRA, 1982).

A forma predominante como se pensava o meio ambiente remonta à Revolução Industrial, quando o desenvolvimento econômico encarava com pouca seriedade as questões ambientais. Tais questões eram vistas como inerentes ao progresso, e não como parte intrínseca dele. Os riscos ambientais advindos do desenvolvimento inconsequente, eram justificados como um “mal necessário”, algo com que se deveria resignar (SOUSA, 2005).

Frente aos efeitos que se tornam cada vez mais evidentes (poluição, degradação do solo, queimadas, desflorestamento, aquecimento global, destruição da biodiversidade etc.), ao crescimento econômico não sustentável e a uma visão limitada da complexidade entre o ser humano e o meio ambiente, percebeu-se a necessidade e a urgência da intervenção do poder público sobre as questões ambientais.

A evolução das políticas ambientais gerou importante marcos de referência, como a criação de políticas públicas que estabeleceram objetivos, ações, programas, leis, regulamentos para promover qualidade do meio ambiente. A legislação ambiental alcançou nos últimos 40 anos consideráveis avanços no mundo (GOLDEMBERG, 2004).

No esforço de construir uma nova abordagem do binômio desenvolvimento-preservação ambiental, surgiram três abordagens em relação à questão ambiental: a abordagem corretiva (em 1970), a abordagem preventiva (em 1980) e a abordagem integradora (em 1990), que fornece a base para a construção da estrutura das políticas ambientais da atualidade (MAGRINI, 2001).

Marcos significativos desta evolução do paradigma ambiental foram a realização da Primeira Conferência Mundial de Meio Ambiente Humano, pela Organização das Nações Unidas (Estocolmo 1972); da Eco-92 (Rio de Janeiro 1992), que promoveu a discussão e divulgação da concepção de Desenvolvimento Sustentável e da Rio+10 (Johannesburg 2002), que se voltou para os temas de erradicação da pobreza, da globalização e das questões energéticas, tais como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), o Protocolo de Kyoto e as Mudanças Climáticas (SOUSA, 2005).

Ao se comparar o desenvolvimento da política ambiental brasileira com as políticas públicas de outros setores da sociedade, fica evidente que aquela se consolidou tardiamente e como consequência da consciência ambiental, mais amadurecida, dos países mais desenvolvidos (SOUSA, 2005). Pode-se observar, também, que nossa política ambiental se desenvolveu, nos últimos quarenta anos, graças à ação de movimentos sociais locais (BREDARIOL, 2001).

Com a finalidade de alcançar patamares mais elevados de desenvolvimento social e econômico, o Brasil vivia o dilema de sacrificar a proteção ambiental pelo progresso da sua sociedade. A abordagem, até a década de 80, fora a adoção de uma ótica corretiva, com relação às questões ambientais, ao invés de uma ótica integradora. Tal posicionamento estratégico, tem impedido a inserção das boas práticas de sustentabilidade no arcabouço de crescimento econômico do país (SOUSA, 2005).

O aperfeiçoamento da legislação ambiental brasileira deu início a uma mudança de postura, onde o governo passou a dar um maior enfoque na gestão da questão ambiental (BREDARIOL, 2001). Tal aperfeiçoamento, ensejou uma robusta doutrina ambiental, cujos postulados norteiam a tutela do meio ambiente e a conduta humana, destacando-se: o princípio da prevenção, da precaução, do poluidor-pagador, usuário-pagador, da participação, da educação ambiental, do direito à informação e o princípio do desenvolvimento sustentável.

Como grandes marcos da política ambiental brasileira pode-se destacar (MACHADO, 2004):

- a) A Lei 6.938/81 da Política Nacional de Meio Ambiente: é a lei ambiental mais importante e define que o poluidor é obrigado a indenizar os danos ambientais a que der causa, independentemente de culpa. O Ministério Público é competente para a propositura de ações civil pública para a reparação por danos ao meio ambiente, impondo ao poluidor a obrigação

de recuperar e/ou indenizar prejuízos causados (art. 129, inciso III, da CRFB/88). Esta lei criou a obrigatoriedade dos estudos e respectivos relatórios de Impacto Ambiental (EIA-RIMA);

- b) A Constituição da República de 1988 (CRFB/88): define, em seu Capítulo VI, “um dos sistemas mais abrangentes e atuais do mundo sobre a tutela do meio ambiente” (MILARÉ, 2000);
- c) A Lei 9.605/98 dos Crimes Ambientais: reordena a legislação ambiental brasileira no que se refere às infrações e punições. A pessoa jurídica, autora ou coautora da infração ambiental, pode ser penalizada, chegando à liquidação da empresa, se ela tiver sido criada ou usada para facilitar ou ocultar um crime ambiental. A punição pode ser extinta caso se comprove a recuperação do dano ambiental. As multas variam de R\$ 50,00 a R\$ 50 milhões de reais;
- d) A Lei 9.795/99 de Política Nacional de Educação Ambiental: define a educação ambiental como o processo por meio do qual o indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade.
- e) O Decreto nº 4.339, de 22 de agosto de 2002, da Política Nacional da Biodiversidade: define que a diversidade biológica tem valor intrínseco, merecendo respeito independentemente de seu valor para o homem ou potencial para uso humano; que as nações têm o direito soberano de explorar seus próprios recursos biológicos, segundo suas políticas de meio ambiente e desenvolvimento; que as nações são responsáveis pela conservação de sua biodiversidade e por assegurar que atividades sob sua jurisdição ou controle não causem dano ao meio ambiente e à biodiversidade de outras nações ou de áreas além dos limites da jurisdição nacional;

A Constituição da República Federativa do Brasil, no artigo 225, estabelece que:

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo para o presente e as futuras gerações”

Este princípio constitucional deu ensejo à criação da Política Nacional de Meio Ambiente que no artigo 2º da Lei 6938/81 que enuncia que a “Política Nacional de Meio Ambiente tem por objetivo a preservação, a melhoria e a recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando a assegurar, no País, condições para o desenvolvimento socioeconômico, os interesses da segurança nacional e a proteção da dignidade da vida humana”. Esta importante Lei modificou a abordagem sobre a questão ambiental nos empreendimentos brasileiros, permitindo alavancar a evolução do País em direção ao Desenvolvimento Sustentável.

A Política Nacional de Meio Ambiente do Brasil atende aos seguintes princípios:

- 1) Ação governamental na manutenção do equilíbrio ecológico, considerando o meio ambiente como patrimônio público a ser necessariamente assegurado e protegido para o uso coletivo;
- 2) A racionalização, planejamento e fiscalização do uso dos recursos ambientais (solo, subsolo, água e ar);
- 3) A proteção dos ecossistemas;
- 4) O incentivo a estudo e pesquisas;
- 5) O acompanhamento da situação da qualidade ambiental;
- 6) A recuperação das áreas degradadas e a proteção das áreas ameaçadas de degradação;
- 7) A educação ambiental, formal e informal;
- 8) A imposição ao poluidor e ao predador da obrigação de recuperar e de indenizar pelos danos causados e, ao usuário, a de contribuir pelo uso de recursos ambientais com fins econômicos;

Cabe destacar o advento da Lei 9605/98 de Crimes Ambientais, que se constitui em importante instrumento para coibir ações que prejudiquem os Biomas presentes no território nacional. A sociedade brasileira, os órgãos ambientais e o Ministério Público puderam, com esta lei, dispor de um importante instrumento que lhes permitiu uma maior agilidade e eficácia na punição aos infratores do meio ambiente. Ao entrar no ordenamento jurídico nacional, possibilitou à sociedade alcançar um equilíbrio na integração dos ecossistemas existentes. Embora a natureza seja abundante, o Brasil possui números grandiosos se comparados a outros países, no que se refere à riqueza da sua biodiversidade (flora, fauna, recursos hídricos e minerais), chegou-se a níveis de dilapidação explícita e irremediável deste patrimônio ambiental e, conseqüentemente,

possível exaustão dos recursos naturais que, embora abundantes, são em sua grande maioria exauríveis (IBAMA, 1998). Crimes praticados contra o meio ambiente são danosos e impactantes ao meio ambiente como um todo, e, conseqüentemente, a toda coletividade, que é a titular do bem ambiental. Esta lei prevê diversas hipóteses criminosas, com aplicação de penas restritivas de direito ou de prestação de serviços à comunidade, e de multa, dependendo do potencial ofensivo do crime praticado. Pode ser aplicada a qualquer pessoa física ou jurídica (COPOLA, 2005).

Outro importante marco legislativo nacional, o Decreto nº 4.339, de 22 de agosto de 2002, trata do atendimento aos princípios e diretrizes da Política Nacional da Biodiversidade, definindo as seguintes ações: conhecimento da biodiversidade; conservação da Biodiversidade; Utilização Sustentável dos Componentes da Biodiversidade; Monitoramento, Avaliação, Prevenção e Mitigação de Impactos sobre a Biodiversidade; Acesso aos Recursos Genéticos e aos Conhecimentos Tradicionais Associados e Repartição de Benefícios; Educação, Sensibilização Pública, Informação e Divulgação sobre Biodiversidade; e Fortalecimento Jurídico e Institucional para a Gestão da Biodiversidade (DIAS, 2008).

A existência de órgãos específicos, como entidades gestoras do meio ambiente (MMA, CONAMA, IBAMA, CONABIO), e a regulamentação de legislação sobre o assunto, levaram o país a um grau de maturidade importante para o cumprimento de etapas da preservação ambiental e do desenvolvimento sustentável.

Como o enfoque dessa tese é a simulação de acidentes radiológicos, através de ambientes virtuais (ambiente computacional), torna-se necessária uma apreciação da política nuclear brasileira dentro do paradigma ambiental, como forma de corroborar a importância de presente proposta de pesquisa para o sistema de proteção nuclear/radiológico.

Atividades humanas, envolvendo o uso de substâncias radioativas, são comuns em diversos setores da sociedade: na agricultura, na aviação, na indústria petroquímica, em restauração, em processo de despoluição, em indústrias, em hospitais, em artefatos militares e na geração de energia. Isto torna a radiação um fator de constante risco para a população e para o meio ambiente.

As conseqüências de um acidente radiológico/nuclear geram um grande impacto sobre a saúde da população, sobre a atividade econômica e, sobretudo, no meio ambiente. A possível contaminação de solo, ar, rios, mares, fauna terrestre, fauna marinha e vegetação, frente a um incidente nuclear ou radiológico, tem gerado a

elaboração de leis e normas para garantir o correto uso de material radioativo e de instalações nucleares e radiativas.

Segundo Fernandez Possa, “O dano nuclear é lesão resultante de acidente ou evento adverso, é consequência de um desastre, que altera o meio, manifestando-se através de perdas humanas, bens materiais, instalações ou ecossistemas, que resulte da exposição de radioatividade ou da combinação desta com propriedades tóxicas, explosivas ou outras propriedades perigosas do combustível nuclear ou dos produtos e rejeitos radioativos” (FERNANDEZ, 2010).

Grandes marcos da política nuclear brasileira e da regulamentação legal referente às atividades nucleares são:

- a) Decreto Federal nº. 40.110, de 10 de outubro de 1956 que criou a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Autarquia Federal responsável pela execução da Política Nuclear Brasileira;
- b) Lei nº. 6.453, de 17/10/1977, das Atividades Nucleares: dispõe sobre a responsabilidade civil por danos nucleares e a responsabilidade criminal por atos relacionados com as atividades nucleares. Determina que se houver um acidente nuclear, a instituição autorizada a operar a instalação tem a responsabilidade civil pelo dano, independente da existência de culpa (responsabilidade objetiva). Em caso de acidente nuclear não relacionado a qualquer operador, os danos serão assumidos pela União. Esta lei classifica como crime produzir, processar, fornecer, usar, importar ou exportar material sem autorização legal, extrair e comercializar ilegalmente minério nuclear, transmitir informações sigilosas neste setor, ou deixar de seguir normas de segurança relativas à instalação nuclear;
- c) Decreto-Lei 1.809, de 07 de outubro de 1980 - estabelece o sistema de proteção nuclear brasileiro e cria o SIPRON, Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro, com objetivo de assegurar o planejamento integrado e de coordenar a ação conjunta e execução continuada de providências, que vise atender às necessidades de segurança das atividades e dos projetos nucleares brasileiros, da população e do meio ambiente.
- d) Constituição Federal de 1988, Artigo 21, inciso XXIII, estabelece que compete à União explorar os serviços e instalações nucleares de qualquer natureza e exercer monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e reprocessamento, a industrialização e o comércio de

minérios nucleares e seus derivados, atendidos os princípios que descreve na alíneas “a” a “d”, dentre os quais ganham relevo que toda atividade nuclear em território nacional será admitida para fins pacíficos e que a responsabilidade civil por danos nucleares independe da existência de culpa.

A elaboração de um arcabouço jurídico, que regule o uso da energia nuclear e artefatos radiativos, de forma pacífica e em harmonia com o ser humano e o meio ambiente é necessidade de toda nação amadurecida política, social e juridicamente. A legislação nuclear deve promover esforços para prevenir ou eliminar os danos causados por um possível acidente radiológico/nuclear.

4 MONITORAMENTO AMBIENTAL E RADIOATIVIDADE

Questões ambientais, surgidas em virtude de intervenções antropomórficas, podem trazer problemas de vulnerabilidade econômica e social. A fim de avaliar as causas destes problemas, torna-se necessário a realização de monitoramento ambiental capaz de gerar indicadores, que permitam um estudo mais profundo dos fenômenos analisados. Estes estudos ambientais são considerados multidisciplinares, porque envolvem uma gama de áreas do conhecimento técnico-científico, que permitam examinar o impacto de um evento no meio ambiente.

Pode-se conceituar a ação de monitoramento ambiental como sendo a capacidade de manter dados (coletar, processar e interpretar) ao longo do tempo, de um determinado fenômeno ambiental. Pode-se dar duas razões para a realização do monitoramento ambiental: determinar o *status* atual do sistema analisado e detectar as mudanças ao longo do tempo deste sistema. Para realizar o processo de monitoramento precisa-se determinar em que categoria esta monitoração ambiental será classificada (WIERSMA, 2004):

- i) a monitoração do tipo simples;
- ii) a do tipo avaliação;
- iii) do tipo “em substituição”;
- iv) do tipo integrado.

A categoria de monitoração do tipo simples se refere a monitorar uma única variável em uma determinada região geográfica ao longo do tempo (ex: monóxido de carbono, ao longo de uma avenida em uma cidade ou deposição de particulado radioativo no solo em região agrícola). A monitoração do tipo avaliação trata de monitoramento com vistas à conservação ambiental (ex: proliferação de espécies invasoras). Frente a um fenômeno observado no meio ambiente realiza-se a coleta de dados para análise e conservação de uma determinada área geográfica. O monitoramento “em substituição” trata da coleta de dados “emprestados” de outro fenômeno, ou seja, a partir de dados de um fenômeno ocorrido no passado infere-se uma análise no presente (ex: análise de amostras de gelo do ártico para obter informações sobre mudanças climáticas). A última categoria proposta é o monitoramento integrado, onde se busca estabelecer relações de causa e efeito dos fenômenos ambientais. Para isto é preciso descobrir as causas de mudanças ambientais

observadas: o que está mudando e porque está mudando. Neste tipo de monitoramento mais complexo exige-se um trabalho multidisciplinar, quer dizer a utilização e participação de diferentes áreas do conhecimento para gerar dados que respondam o como e o porquê da mudança ambiental (ex: aquecimento global) (WIERSMA, 2004).

Outro aspecto significativo do monitoramento ambiental, que pode ser inserido nas diferentes categorias apresentadas, é a capacidade de montar uma rede de monitoramento capaz de obter dados de diferentes localizações geográficas em intervalos variados de tempo (por exemplo, horas, dias e meses).

Para realizar um programa de monitoramento ambiental pode-se, por exemplo, fazer uso da metodologia desenvolvida por Boesch (BOESCH, 1990) representada abaixo através de um *workflow* (Figura 7):

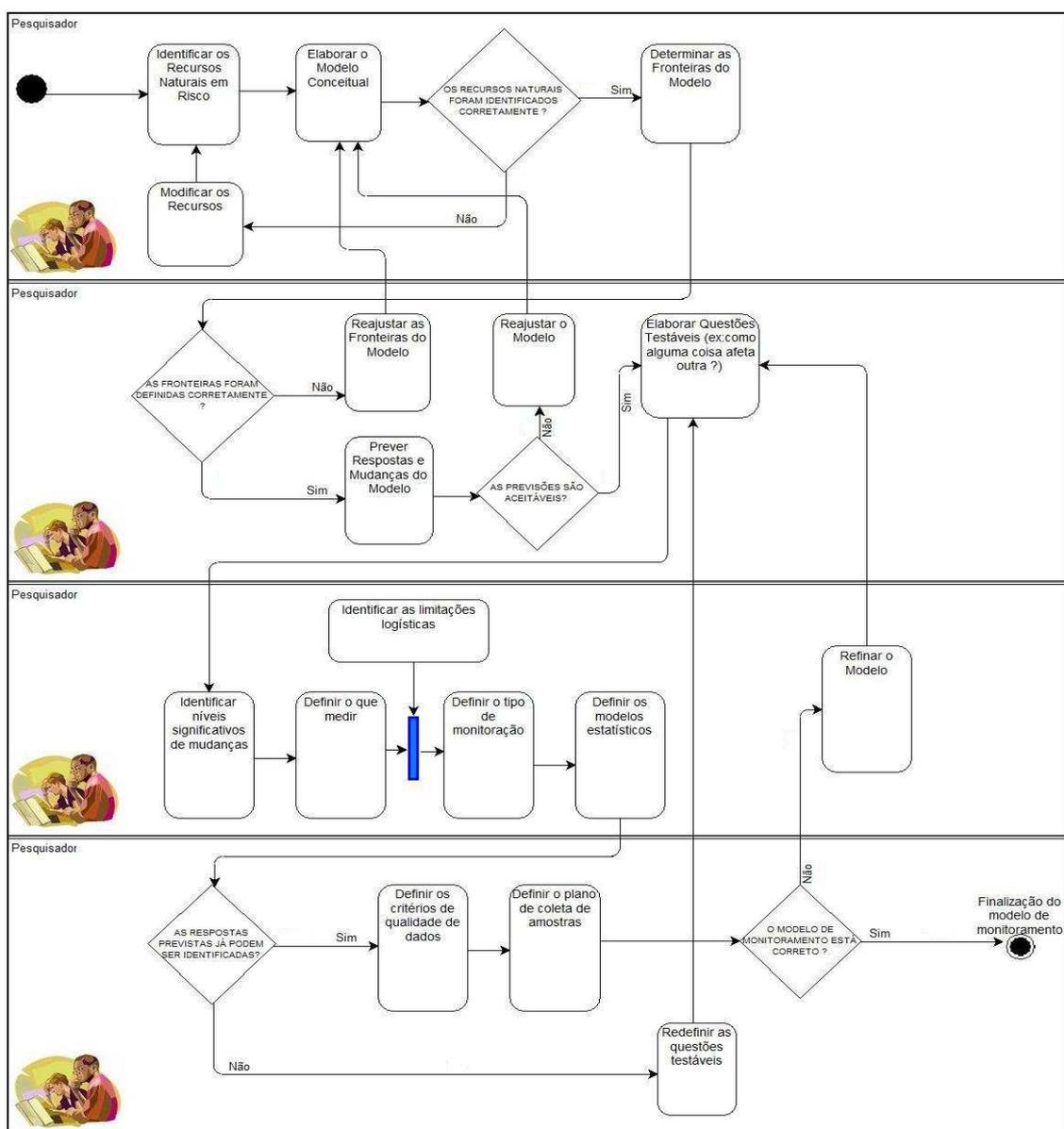


Figura 7 - Metodologia de monitoramento ambiental

Direcionando o enfoque desse tópico para a área de radioproteção e segurança nuclear, constata-se que a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estabelece normas para a implantação de monitoração radiológica ambiental. A Norma CNEN NN-3.01 define as "Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica". Esta norma dispõe, no item 5.14.1 letra (a), que "em relação às fontes sob sua responsabilidade, os titulares devem estabelecer, implementar e manter medidas para estimar a exposição do público, incluído, quando aplicável, programa de monitoração radiológica ambiental" (CNEN, 2011).

A posição regulatória 3.01/008:2011 define que "monitoração ambiental é o processo planejado e sistemático de realizar medições de campos de radiação, de radioatividade e de outros parâmetros no meio ambiente, incluindo a interpretação dos resultados dessas medições, com o objetivo de caracterizar, avaliar ou controlar a exposição do indivíduo, do público, em especial do grupo crítico, resultante de uma prática. A monitoração ambiental é realizada por meio da condução de um Programa de Monitoração Radiológica Ambiental (PMRA)" (CNEN, 2011).

Esta mesma posição regulatória, também, define que o "PMRA constitui-se de uma rede de medições de campo de radiação, de radioatividade e de outros parâmetros ambientais importantes, estabelecidos com base nas características próprias da prática e da região, onde devem estar especificados" (CNEN, 2011):

- a) O tipo e a frequência das medidas;
- b) Os métodos de medidas ou amostragem e subseqüentes análises laboratoriais;
- c) As metodologias para avaliação e registro dos dados; e
- d) A documentação dos resultados.

Neste mesmo documento pode-se destacar que "o estabelecimento de um PMRA tem que levar em conta o seguinte" (CNEN, 2011):

- a) Objetivos das medições;
- b) Características das descargas: identificação do termo fonte para cada via de liberação e das condições de dispersão do efluente no meio ambiente;
- c) Características do local: localização e descrição dos grupos de população, localização cartográfica dos recursos hídricos, naturais, histórico-culturais e produtivos;

d) Estimativa de dose: definição de vias críticas de exposição, dos radionuclídeos críticos, dos grupos críticos, do modelo de avaliação, e valores de parâmetros genéricos e específicos relativos ao local e às fontes;

e) Níveis operacionais: valores a serem utilizados no estabelecimento dos níveis mínimos que devem ser detectados, para cada radionuclídeo e meio monitorados;

f) Resultados obtidos nos programas precedentes, quando aplicável.

Outra definição importante da Posição Regulatória 3.01/008:2011 é quanto às informações que o PMRA deve conter (CNEN, 2011):

a) Identificação cartográfica dos pontos que formam a rede de monitoração;

b) Especificação, em função das diferentes vias de exposição, dos meios e bio-indicadores a serem monitorados;

c) Tipos e frequências das medições, amostragens e subsequentes análises laboratoriais;

d) Limites mínimos de detecção, com base nos níveis operacionais, para cada radionuclídeo em função do meio monitorado;

e) Métodos de medidas, amostragem e análise;

f) Especificação dos equipamentos e sistemas de medição e de detecção necessários, em função dos tipos de medidas e dos limites mínimos de detecção requeridos;

g) Metodologia para análise crítica e tratamento dos dados;

h) Critérios e metodologia para avaliação dos resultados;

i) Definição da equipe técnicas necessária à implantação e à manutenção do PMRA e de um programa de qualificação e de treinamento adequados;

j) Ações a serem implementadas quando os níveis de referência forem atingidos;

k) Programa de supervisão da região, de modo a identificar modificações significativas nas condições de dispersão dos efluentes, de ocupação do local, do uso das terras e dos recursos hídricos que indiquem a necessidade de reavaliação do PMRA;

l) Periodicidade para reavaliação da adequação do PMRA.

Entende-se e propõe-se que uma das formas de se contribuir para um sistema de monitoramento ambiental integrado é a construção de um ambiente computacional (nesta tese um ambiente virtual), através do qual se poderá examinar áreas geográficas impactadas, delimitar as fronteiras do evento observado e elaborar cenários para a

análise das consequências de um acidente radiológico sobre a população e o meio ambiente.

As ações de identificação cartográfica dos pontos que formam a rede de monitoração, do programa de supervisão da região, da caracterização do local e a da estimativa de dose, são implementadas na construção do ambiente virtual proposto por esta tese, conforme será visto a partir do capítulo 5 “Simulação de Acidentes Radiológicos”.

4.1 Gestão da emergência radiológica

Um dos aspectos mais relevantes da gestão de uma emergência radiológica é a capacidade de rapidamente estimar as consequências do acidente. Esta ação tem sua importância por causa da necessidade de tomar medidas imediatas de proteção com base nas informações disponíveis. A capacidade de avaliar o acidente radiológico deve ser um processo interativo e dinâmico, visando tornar mais detalhada e completa as informações sobre o mesmo, a fim de garantir adequada proteção ao pessoal técnico, a equipe de emergência e ao público (IAEA, 1997).

A gestão de emergência radiológica envolve a execução de procedimentos para a classificação do acidente, avaliação das suas consequências, coordenação do monitoramento ambiental, interpretação de dados ambientais, determinando de ações de proteção para o público, controle das doses absorvidas pelas equipe de emergência, avaliação das doses absorvidas pelo público, descontaminação do público, descontaminação de áreas afetadas, execução de tratamento hospitalar, integração com forças militares, civis e do corpo de bombeiros e comunicação com a sociedade (IAEA, 1997).

Os principais objetivos a serem atingidos na gestão de emergência radiológica /nuclear são (IAEA, 1997) :

- 1) Prevenir os efeitos determinísticos sobre a saúde (mortos e feridos), agindo antes ou logo após a contaminação radioativa e mantendo as doses absorvidas pelo público e pelas equipes de emergência abaixo dos limites estabelecidos (ver Tabela 01);

2) Reduzir o risco de efeitos estocásticos sobre a saúde (principalmente câncer e efeitos hereditários), implementando ações de radioproteção e análises das taxas de dose ambientais, mediante análise de amostras de plantas, água, solo, alimentos e leite.

Pode-se definir como ações prioritárias de proteção ao público, em função da magnitude do acidente radiológico, os seguintes procedimentos:

- a) Evacuar ou abrigar o público que se encontrava próximo a local do acidente;
- b) Recomendar ao público localizado um raio de 300 km do evento, a evitar comer alimentos ou beber leite potencialmente contaminados.
- c) Dar informações sobre urgentes contramedidas agrícolas aos agricultores e indústria de alimentos;
- d) Rastrear indivíduos, potencialmente expostos, para posterior acompanhamento médico;
- e) Fornecer ao público, potencialmente exposto à radioatividade, um agente bloqueador (pílulas de iodo) para tireóide;

Pode-se definir como as principais ações de proteção ao público, em função da taxa de dose equivalente, os seguintes procedimentos:

- a) Para taxa de dose equivalente 1 mSv/h, em uma pluma radioativa, recomenda-se a evacuação ou abrigo.
- b) Para taxa de dose equivalente de 0,1 mSv/h, em uma pluma radioativa, recomenda-se aplicação do agente bloqueador para tireóide e abrigo temporário.
- c) Para taxa de dose equivalente de 1 mSv/h, em deposição de material radioativo no meio ambiente, recomenda-se a evacuação ou abrigo.
- d) Para taxa de dose equivalente de 0,2 mSv/h, em deposição de material radioativo no meio ambiente, recomenda-se a realocação temporária.
- e) Para taxa de dose equivalente de 1 μ Sv/h, em deposição de material radioativo no meio ambiente, recomenda-se restrição de consumo de alimentos, água e leite.

Pode-se estabelecer como principais ações de avaliação ambiental frente a um acidente radiológico os seguintes procedimentos de monitoração:

- a) Caracterizar a classe do acidente;
- b) Caracterizar a duração do acidente;
- c) Identificar a direção do vento;
- d) Monitorar as doses ao redor do local do acidente;
- e) Identificar as concentrações de isótopos no ar;
- f) Gerar mapas de deposição de I-131 e Cs-137 ;
- g) Identificar as concentrações dos isótopos em amostras de alimentos, água e solo.

O uso de uma ferramenta computacional para o suporte à gestão de emergência radiológica é fundamental para a execução das ações planejadas. Com base nas informações de localização geográfica do acidente, do tipo de material radioativo envolvido e do tempo de exposição no meio ambiente, pode-se construir cenários que simulem o acidente radiológico e determinem:

- i. A avaliação de sua magnitude;
- ii. As suas consequências;
- iii. Os pontos geográficos para coleta de amostras ambientais;
- iv. As áreas de segurança para a população;
- v. As medidas para acompanhamento médico.

5 SIMULAÇÃO DE ACIDENTES RADIOLÓGICOS

Simulação é o processo de construção de um modelo de um sistema real e a capacidade de conduzir experimentos com este modelo, a fim de compreender o comportamento do sistema e para avaliar como ele funciona. Simulações podem ser usadas para descrever e analisar o comportamento de um sistema complexo, responder às perguntas sobre o mesmo e a compreender um fenômeno do mundo real (BANKS, 1998).

A implementação de modelos para sistemas dinâmicos torna-se uma tarefa de alta complexidade, quando não se possui uma ferramenta que permita a modelagem, a descrição, a simulação e a análise do fenômeno em estudo. Mediante o uso de um *software*, é possível representar virtualmente fenômenos naturais, fenômenos antropomórficos e obter uma compreensão mais profunda do seu desenvolvimento e comportamento.

Quando um fenômeno é complexo demais para ser estudado de forma analítica, é necessário, então, recriá-lo em um universo artificial em que experimentos possam ser feitos em menor escala e em um ambiente que represente virtualmente o mundo real (DROGOUL ; FERBER, 1994). Dessa forma, modelos computacionais podem ser usados para entender mais sobre como funcionam os processos do mundo real. Estes modelos permitem o estudo de uma ampla gama de processos e a compreensão de sua estrutura. Tais modelos, também, permitem reduzir o custo e o tempo de realização de experiências reais, que são muitas vezes onerosas quando executadas. Ressalta-se, também, que essas simulações podem ser repetidas muitas vezes, que elas não são invasivas e que os dados gerados permitem uma visão global do fenômeno do mundo real (GIMBLETT, 2002).

Alguns exemplos de fenômenos do mundo real que podem ser modelados são: o crescimento populacional, os acidentes radioativos, os acidentes químicos, a erosão do solo, o movimento dos rios, as doenças epidêmicas, as pragas agrícolas, os incêndios florestais, a expansão de favelas em áreas urbanas, o tráfego de veículos nas grandes cidades, as mudanças climáticas e a migração animal. Esses processos produzem efeitos sobre a população, o meio ambiente e áreas geográficas. As informações produzidas, através de uma modelagem, devem ser analisadas e resultar em procedimentos que

mitiguem as ações do homem sobre o meio ambiente (DE ALMEIDA SILVA; FARIAS, 2009).

Outras vantagens do uso da simulação incluem:

1) Maior fundamentação no processo de tomada de decisão: a simulação permite implementar uma série de cenários com um consumo mínimo de recursos, quando comparados com as respectivas situações reais. Isto é crítico porque uma vez que a decisão de implementar uma política é tomada no mundo real, material e recursos humanos são utilizados, gerando custos.

2) A compressão ou expansão de tempo: uma simulação pode comprimir ou expandir a duração de um processo ou fenômeno, de modo a permitir uma análise completa e oportuna do mesmo. Pode-se examinar um problema em minutos ou passar horas observando todos os eventos.

3) A fim de compreender um fenômeno em sua totalidade, frequentemente é necessário conhecer porque, onde e quando ele ocorre no mundo real. Graças à simulação, é possível obter respostas por meio da reconstrução de um cenário e, posteriormente, a realização de uma análise microscópica do sistema. No mundo real, muitas vezes é muito difícil fazer isso, porque é impossível observar ou controlar o sistema completamente.

4) Diagnóstico do problema: os fenômenos dinâmicos têm um alto grau de complexidade; uma vantagem da simulação é que ela nos permite compreender as interações entre diferentes variáveis. Isso ajuda no diagnóstico de problemas e permite ter uma melhor compreensão do processo.

5) Preparação para mudanças: é um fato que o futuro traz mudanças. Compreensão com antecedência do "porquê" e "como" essas mudanças terão lugar é muito útil para reformular os sistemas/processos existentes e prever o comportamento de acordo com diferentes cenários.

6) Treinamento de pessoal: modelos de simulação são ferramentas de treinamento excelentes quando projetados para essa finalidade. Usados convenientemente as equipes podem prover soluções, avaliar erros eventuais, comparando-as a cada um dos cenários propostos.

Algumas desvantagens da simulação são as seguintes (BANKS, 1998):

- 1) A construção de um modelo eficaz é uma forma de arte: requer conhecimento e prática especiais acumulados ao longo do tempo e experiência. Se dois modelos do mesmo sistema são construídos por

dois técnicos distintos e competentes, eles podem ser até semelhantes, mas é improvável que sejam idênticos.

- 2) Simulações podem ser difíceis de interpretar: quando a maioria das saídas de simulação são variáveis aleatórias, os resultados podem ser muito difíceis de analisar.
- 3) Eventualmente a modelagem e análise de um sistema complexo pode ser demorada e cara.

Ao adotar este enfoque de modelagem computacional de fenômenos complexos, representativos de um processo que ocorre no mundo real, percebe-se que o emprego de um ambiente virtual na simulação de acidentes radiológicos traz como ganhos a possibilidade de treinamento constante de pessoal técnico dedicado a lidar com esses acidentes (equipe de emergência radiológica, pessoal da defesa civil, militares e bombeiros).

Para a construção de um ambiente virtual, que seja capaz de simular um acidente radiológico, é preciso levar em conta os seguintes requisitos funcionais:

- i. Ser capaz de avaliar o impacto do acidente junto à população;
- ii. Ser capaz de visualizar o impacto do acidente no meio ambiente;
- iii. Ser uma ferramenta de gestão à emergência radiológica;
- iv. Ser capaz de modelar cenários alternativos;
- v. Ser uma ferramenta de treinamento de pessoal técnico.

É preciso, também, levar em conta os seguintes requisitos operacionais para o ambiente virtual:

i) Possuir adequada representação do espaço em que ocorrem os eventos e das entidades envolvidas: pessoas, fontes radioativas, as diversas características que compõem o meio ambiente (rios, rodovias etc.);

ii) Possuir adequada visualização do espaço e das características;

iii) Possuir capacidade de simular os acidentes radiológicos, i.e., a interação entre as fontes radioativas e os indivíduos e o meio ambiente;

iv) Possuir capacidade de armazenamento e recuperação dos diversos tipos de informação necessária à avaliação do impacto de um acidente radiológico.

5.1 A representação do espaço no ambiente virtual

No chamado mundo real, um determinado processo ocorre simultaneamente com uma miríade de outros processos. Todos esses processos se desenvolvem em um *continuum* de massa, energia e tempo (o mundo). Todas as coisas deste *continuum* estão interligadas de alguma forma. Definir um processo como tal é por si só um ato de abstração. Uma maneira de estudar um processo é efetuar a divisão do *continuum* em três entidades: o observador, o processo em si e o resto do *continuum*. O observador geralmente simplifica o processo em sua tentativa de compreendê-lo. Considera alguns fatores e variáveis relevantes ao processo e ignora ou exclui outros. Todas as variáveis envolvidas num determinado processo formam um tipo de microcosmo ou minimundo. Usando o método científico, pretende-se determinar as leis que governam a interação entre determinadas entidades nesse microcosmo. Para este fim, diferentes modelos e técnicas podem ser usadas.

Um ambiente virtual é um ambiente computacional representativo de um subconjunto do mundo real, e onde os modelos de entidades, processos e eventos do mundo real são incluídos em um espaço virtual (a contraparte do espaço tridimensional). A criação de um ambiente virtual é uma importante ferramenta para a simulação de certos processos críticos, especialmente aqueles em que os seres humanos ou as coisas são susceptíveis de sofrer danos irreversíveis ou de longo prazo.

Um recurso significativo na criação de ambientes virtuais é o uso dos chamados agentes autônomos (ver item 5.2). Esta técnica computacional permite modelar, por exemplo, o comportamento humano no ambiente (seu deslocamento até um determinado ponto), monitorar na linha do tempo esse comportamento, visualizar os resultados obtidos e interpretar os dados gerados (crescimento populacional) (GIMBLETT, 2002).

Nesta tese combina-se uma representação do espaço tridimensional com referências geográficas, modelos baseados em agentes autônomos, e uma representação adequada do tempo, com o objetivo de construir ambientes virtuais capazes de simular fenômenos e/ou processos. As representações georeferenciadas candidatas a representar o espaço tridimensional são:

- i) a representação espacial dos tradicionais sistemas de informação geográfica (SIG);
- ii) a representação adotada pelo *Google Maps*TM /*Google Earth*TM (GOOGLE, 2011).

A adição de agentes autônomos a essas representações espaciais permite simular eventos, mensurar e quantificar variáveis, obter uma possível distribuição espacial de pessoas e objetos, estimar os impactos ambientais, construir cenários alternativos e treinar pessoal para lidar com estes processos.

A adoção da representação utilizada pelo *Google Maps*TM /*Google Earth*TM fornece, como vantagem adicional, o acesso ao ambiente virtual via *Web* que faz uso de uma plataforma georeferenciada bastante amigável, popular e a instantânea disseminação de informação e orientação técnica, no caso da ocorrência de acidentes.

5.1.1 Representação espacial nos sistemas de informação geográfica (SIG)

O registro de fenômenos espaciais através de codificação pré-determinada (mapas), permitiu a criação de um modelo de distribuição dos fenômenos naturais e assentamentos humanos que se tornou muito importante na orientação sobre a distribuição da população, análise ambiental, navegação, rotas comerciais e estratégias militares.

Sistemas de informação geográfica (SIG) são sistemas capazes de armazenar, manipular, analisar e exibir dados que são mapeados em um sistema de coordenadas geográficas (ou georeferenciado). A informação geográfica está codificada no SIG através de objetos geográficos (representação vetorial), tais como pontos, linhas e áreas ou através de representação *raster* (imagens de satélite) em que dados são codificados como *pixels*. Para representar alguma região da Terra, por exemplo, é possível associar estes objetos a entidades do mundo real, tais como rios, montanhas, cidades, edifícios etc. - e definir os seus atributos, limites e localização.

Os SIG's funcionam através da combinação de dados tabulares com dados espaciais. Os diversos tipos de informações modeladas pelos SIG's são estruturados em camadas (*layers*) de informações afins e os objetos espaciais classificados em uma camada podem ser visualizados separadamente dos demais. É possível ver as camadas

de dados espaciais e sua ligação com os dados tabulados (estradas, edifícios, a população, plantações, ferrovias, portos, aeroportos, consumidores, edifícios, redes de água etc.). Portanto, SIG permite a representação do mundo real através de vários aspectos da geografia, que são separados em camadas temáticas.

Compreender como usar um SIG não é simplesmente dominar o uso de mapas; é necessário aprender como uma pessoa vê o mundo, que modelos são usados para representar o que é observado e que tipos de codificação são usados para representá-los. A representação de um mapa em SIG pode ser considerada como uma projeção visual de um banco de dados espaciais em um determinado momento (BURROUGH, 1998).

A utilização sistemática de SIG's permite a construção de bancos de dados espaciais muito grandes. Os dados podem ser exibidos através de mapas, tabelas ou gráficos, sendo possível compilar informações de mapas temáticos relacionados a um assunto específico. Isso facilita o armazenamento de um grande volume de dados relevantes para um determinado fenômeno em estudo.

As funções básicas de SIG são (BURROUGH, 1998):

- a. Mostrar a localização de uma entidade;
- b. Mostrar a distância entre uma entidade e um lugar;
- c. Calcular o número de ocorrências de uma entidade;
- d. Calcular o tamanho de uma área;
- e. Permitir o cruzamento de vários dados espaciais;
- f. Determinar a melhor rota de um ponto a outro em uma área geográfica;
- g. Listar os atributos de uma entidade localizada em certos pontos;
- h. Reclassificar ou recolorir entidades que têm atributos similares;
- i. Conhecer o valor de uma entidade em algum ponto e ser capaz de prever o seu valor em outro ponto;
- j. Simular o efeito de um processo ao longo do tempo para um determinado cenário;

É necessário o uso de técnica específica, a fim de se construir modelos de dados espaciais e suas estruturas de dados utilizados em SIG. Esta técnica permite descrever o fenômeno geográfico e consiste das seguintes etapas (BURROUGH, 1998):

- i. A construção do modelo do mundo real (visão da realidade);
- ii. A construção do modelo conceitual (abstração humana analógica);

- iii. A construção do modelo espacial (a formalização da abstração sem seguir qualquer convenção);
- iv. A construção do modelo lógico (que reflete a forma como os dados serão armazenados no computador);
- v. A construção do modelo físico (como os arquivos são organizados efetivamente no computador);
- vi. A construção do modelo de definição de manipulação de dados (as regras para processamento de dados);
- vii. A construção do modelo de *Graphic User Interface* (as regras e procedimentos para a exibição de dados espaciais);

É possível a utilização de SIG's para qualquer atividade que requeira informação georeferenciada (localização no espaço geográfico). O potencial do sensoriamento remoto e SIG facilitam o planejamento, controle e gestão de grandes áreas geográficas.

Coleção de dados georeferenciados permite a realização de análises temporais e espaciais e fornece parâmetros para implementação de programas de gestão em determinadas áreas.

Em áreas onde há um fenômeno complexo, um mapa georeferenciado pode revelar a extensão do fenômeno, relevos existentes, estradas, cidades e até ruas e edifícios. Estes dados permitem uma análise detalhada do fenômeno e seu potencial impacto sobre uma área urbana, por exemplo.

Para a tecnologia SIG ser utilizada de forma eficaz, é necessário definir uma metodologia que permita a extração dos dados a serem analisados. Esta metodologia consiste das seguintes etapas (BURROUGH, 1998):

- 1) Eleger a área de estudo (definir os seus limites);
- 2) Definir as fontes de informação;
- 3) Coletar dados;
- 4) Analisar os dados coletados;
- 5) Fornecer dados geo-referenciados;
- 6) Gerenciar o uso da informação.

Os sistemas de informação são amplamente utilizados pelas empresas para gerenciar seus dados organizacionais. Através de sistemas baseados em banco de dados, um grande volume de informação pode ser armazenado, relativos às diferentes áreas de um negócio. Os assim chamados dados espaciais referem-se à informação associada a uma área geográfica (topografia, hidrografia, terras, cidades, população, produção

agrícola, infraestrutura etc.) delimitada pelas suas coordenadas (latitude, longitude). Estes dados são gerenciados por sistemas de informação geográfica (SIG). O SIG fornece não apenas a visão espacial de uma determinada área, mas também os dados sobre ela ao longo do tempo, permitindo efetuar uma análise mais que fundamentada na tomada de decisões estratégicas. Todos os dados são georeferenciados e armazenados em bancos de dados espaciais. Desta forma, o SIG possibilita registrar, classificar, padronizar, mapear e visualizar um grande volume de informações sobre uma área geográfica existente.

5.1.2 Representação espacial nos sistemas Google MapsTM e Google EarthTM

Dados geográficos são visualizados no *Google MapsTM* e no *Google EarthTM* através da *Keyhole Markup Language (KML)*. *KML* é uma notação baseada no padrão XML para visualização e anotação de dados geográficos em navegadores (*browsers*) da Internet para mapas bidimensionais (*Google MapsTM*) e tridimensionais (*Google EarthTM*). Dessa forma, usa uma estrutura baseada em *tags* com elementos aninhados e atributos. Pode-se identificar locais, adicionar imagens superpostas, ícones, *polylines* e polígonos, incluir textos descritivos codificados em *html* etc. Todos pontos visualizados possuem uma latitude e longitude. Atualmente *KML* é um padrão internacional mantido pelo *Open Geospatial Consortium, Inc. (OGC)*.

O documento *KML* abaixo identifica a localização da Usina de Angra dos Reis (RJ) nas coordenadas especificadas:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2" xmlns:gx="http://www.google.com/kml/ext/2.2"
xmlns:kml="http://www.opengis.net/kml/2.2" xmlns:atom="http://www.w3.org/2005/Atom">
<Document>
  <name>usinaangra2011.kml</name>
  <Style id="amostraM">
    <IconStyle id="amostraIcon">
      <Icon>
        <href>http://georad.ird.gov.br/georad/imagens/mineral.png</href>
      </Icon>
    </IconStyle>
  </Style>
  <Placemark id="placemark1181">
    <description><![CDATA[Amostra: 1181 - Municipio:Angra dos Reis - ano:
```

```

Cs137 : 0,75 Bq/kgseco
<p><a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.07.017">Consulte o artigo</a>
</p>]]</description>
      <styleUrl>#amostraM</styleUrl>
      <Point>
        <coordinates>-44.27,-23,0</coordinates>
      </Point>
    </Placemark>
  </Document>
</kml>

```

KML pode ser usada para (OGC, 2008):

- i) Mapear a Terra;
- ii) Especificar ícones e *labels* para identificar locais na superfície do planeta;
- iii) Criar diferentes posições de câmeras para definir visões únicas para *features KML*;
- iv) Definir sobreposições de imagens para anexá-las à superfície terrestre ou ao vídeo;
- v) Definir estilos para especificar a aparência de *features KML*;
- vi) Escrever descrições em HTML das *features KML*, incluindo *hyperlinks* e imagens incorporadas;
- vii) Organizar as *features KML* em hierarquias;
- viii) Localizar e atualizar documentos *KML* recuperados de redes locais ou remotas;
- ix) Definir a localização e orientação de objetos tridimensionais com textura.

Como maior vantagem da adoção dos serviços do *Google Maps™* e/ou *Google Earth™*, destaca-se a utilização dos serviços oferecidos pela *Application Program Interface (API)* do *Google Maps™*, como será visto no item 6.1. Os serviços disponibilizados pela API incorporam uma série de funcionalidades típicas dos Sistemas de Informação Geográfica a estes sistemas típicos do ambiente Internet.

5.2 As características dos sistemas baseados em agentes (SBA)

A palavra "agente" refere-se a todos os seres que possuem a capacidade, habilidade e permissão de agir em seu próprio nome e de outros. Em se tratando de seres humanos, os agentes seriam pessoas com mais conhecimento ou uma capacidade

mais especializada numa determinada área, o que lhes permite ajudar outras pessoas a realizar suas tarefas. Por exemplo, uma secretária toma decisões e lida com situações particulares, em nome de seu chefe, poupando-lhe de ter que realizar determinadas tarefas, tais como agendamento de consultas e reuniões etc. (WOOLDRIDGE ; JENNINGS, 1995).

Agentes autônomos, ou agentes, são o equivalente em *software* de entidades do mundo real, como seres humanos, animais, vírus, navios, carros etc. Por este motivo, várias definições para agentes autônomos coexistem, decorrentes de perspectivas diversas dos autores sobre o assunto (DE ALMEIDA SILVA; FARIAS, 2009; FARIAS ; SANTOS, 2005). Segundo Wooldridge (WOOLDRIDGE ; JENNINGS, 1995), um agente seria: "Um sistema situado dentro de um determinado ambiente, que percebe o ambiente através de seu mecanismo de percepção e atua sobre esse ambiente e/ou em outros agentes, ao longo do tempo, em busca de sua própria agenda, planos ou crenças. Eventualmente o mecanismo de percepção/ação do agente evolui com o tempo" (Figura 8).

Em certo sentido, os autônomos celulares podem ser pensados como os precursores dos agentes de *software*. Os agentes mais simples, os reativos, podem facilmente ser implementados usando-se o conceito de autômatos celulares. Cada célula, em função do *input* recebido, e do seu estado, gera um *output*.

A ideia de um autômato abstrato surgiu do trabalho de Alan Turing na máquina de desenvolvimento (LEVY, 1992). O autômato celular foi popularizado por John Von Neumann e Ulam Stanislaw, em 1950, através do desenvolvimento do modelo de *tesselation* (LEVY, 1992). A ideia de se conectar e interagir unidades espaciais foi desenvolvidos por Norbert Wiener em seu trabalho sobre a cibernética (Winner, 1948-1961) (LEVY, 1992). Autômatos celulares foram originalmente usados para descrever as unidades de uma série de redes, que interagem e influenciam uma às outras através de mensagens. Estas redes têm sido usadas como abstrações para representar uma série de fenômenos: dispositivos computacionais, redes neurais, o cérebro humano, tecidos celulares e redes ecológicas etc. Elas foram popularizadas na obra de John Horton Conway chamado *The Game of Life* (GARDNER, 1971), e amplamente aplicadas nas áreas de física, química, biologia e ecologia (WOLFRAM, 2002).

Agentes autônomos podem ser classificados de acordo com sua amplitude de percepção, sua capacidade de agir e a eficácia da sua ação. Nos extremos inferiores e superiores desta escala encontram-se, respectivamente, os agentes reativos e os agentes

cognitivos. Agentes reativos apenas reagem de uma maneira oportuna e de acordo com comportamentos padrão muito simples a mudanças que eles percebem no ambiente. Os agentes cognitivos são mais elaborados. Não só interagem com seu ambiente, mas também são capazes de lembrar experiências anteriores, aprendem a partir destas experiências, comunicam-se uns com os outros e, finalmente, perseguem um objetivo definido, estratégia ou plano.

Sistemas multiagentes (SMA) são compostos de vários agentes que, além de terem as características acima mencionadas, podem interagir uns com os outros através de mecanismos de comunicação. No caso mais geral, esses agentes autônomos podem apresentar grande variação entre si e exibir comportamento competitivos ou colaborativos, dependendo do contexto (WOOLDRIDGE ; JENNINGS, 1995).

Simulações, utilizando sistemas multiagentes (SMA), fornecem uma plataforma computacional em que a dinâmica dos sistemas espaço-temporais pode ser estudada. Para tanto, é possível usar agentes autônomos do tipo reativo (mais simples) ou cognitivo (mais complexo) (BENENSON; TORRENS, 2004; WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995).

Também se pode dizer que um agente autônomo é um sistema computacional situado em um ambiente, e que é capaz de ação autônoma dentro deste ambiente, a fim de atender os objetivos para os quais foi projetado. Por autonomia, se quer dizer simplesmente que o sistema deve ser capaz de agir sem a intervenção direta de qualquer ser humano (ou de outro agente), e deve ter controle sobre suas próprias ações e estado interno (LONGLEY ; BATTY, 2003).

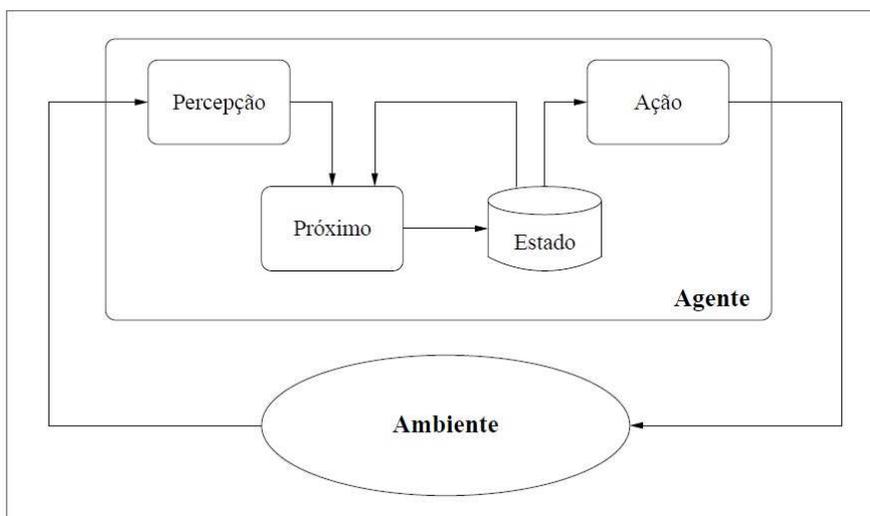


Figura 8 - Agente autônomo
Fonte: WOOLDRIDGE, 2002

Os agentes autônomos apresentam ainda as seguintes propriedades:

- i. Habilidade social: agentes devem ser capazes de interagir, quando julgarem apropriado, com outros agentes artificiais e seres humanos, a fim de resolverem seus próprios problemas e ajudar terceiros em suas atividades. Isto requer que os agentes possuam determinados mecanismos de comunicação;
- ii. Resposta (*responsiveness*): os agentes devem perceber seu ambiente e responder em tempo hábil às mudanças que nele ocorrem;
- iii. Proatividade: agentes não devem simplesmente agir em resposta ao seu ambiente; devem ser capazes de exibir comportamento oportunista, orientado a objetivos e tomar a iniciativa onde e quando apropriado.

Além dessas propriedades, uma série de outras características potencialmente desejáveis têm sido propostas, dentre elas (MAGUIREIRE; BATTY; GOODCHILD, 2005):

- i) Capacidade de adaptação - a capacidade de um agente em modificar seu comportamento ao longo do tempo, em resposta a mudanças nas condições ambientais;
- ii) Um aumento do conhecimento na solução de problemas;
- iii) Mobilidade - a capacidade de um agente de alterar a sua localização física de forma a facilitar a solução de problemas;
- iv) Veracidade - a suposição de que um agente não vai comunicar conscientemente informações falsas;
- v) Racionalidade - a suposição de que um agente vai agir para atingir seus objetivos e não agir de tal forma a impedir que seus objetivos sejam alcançados sem justa causa.

É possível modelar o comportamento das pessoas em um determinado ambiente através da tecnologia computacional de agentes autônomos, bem como considerar outros elementos que interagem com essas pessoas, observando seu comportamento e as consequências dessas interações e usando essa mesma tecnologia.

Como proposta desta tese, um ambiente será criado, onde agentes autônomos, localizados em uma representação espacial do tipo *Google Maps*TM, irão simular alguns elementos que existem em um cenário de acidente radiológico. Esses agentes autônomos terão algumas propriedades, tais como: reatividade, mobilidade e objetividade. Pessoas, objetos e elementos serão também representados por agentes

autônomos. Desta forma, será possível estudar, analisar e gerenciar o fenômeno em estudo através de sistemas baseado em agentes (SBA).

5.3 Integrando sistemas baseados em agentes (SBA) com sistemas de informação geográfica (SIG) ou resrepresentações espaciais equivalentes

Os modelos, a serem construídos para representar diferentes processos, fenômenos ou sistemas, serão baseados no comportamento de objetos ao longo do tempo. Os eventuais movimentos de pessoas e/ou objetos serão levados em conta, os quais são representados por um sistema baseado em agentes (SBA). A área espacial, ou ambiente, onde as pessoas e objetos interagem também será incorporada ao modelo através de uma representação compatível ou equivalente à usada em sistemas de informações geográficas (SIG's).

Um agente autônomo típico, em um sistema baseado em agentes (SBA), possui variáveis de estado, que determinam a sua situação no sistema, e algum comportamento, similar aos métodos de objetos em programação orientada a objetos. Exemplificando: um agente autônomo, que representa uma pessoa em algum processo, teria as seguintes variáveis de estado: i) uma identidade pessoal; ii) uma posição dada por um conjunto de coordenadas (x, y, z); iii) uma direção ou ângulo relativos ao norte verdadeiro; iv) uma velocidade determinada. Seu comportamento poderia envolver: i) mover-se para alguma posição; ii) aumentar ou diminuir sua velocidade.

O ambiente virtual proposto (Figura 9) deve incluir uma representação adequada do espaço ou ambiente em que esses agentes autônomos recebem estímulos *sensoriais* que os levam a produzir resultados na forma de ações. Em geral, os sistemas de informação geográfica (SIG) usam uma estrutura *raster* ou vetorial para representar o espaço em modelos bidimensionais. Em alguns casos, uma terceira dimensão é representada através de modelos de elevação digital (DEM) de um terreno. Dada uma representação espacial de um SIG (um arquivo de *shape*, por exemplo) serão incorporados ou adicionados à mesma um sistema baseado em agentes (SBA) e a estrutura de um modelo espacial dinâmico, incorporando a dimensão temporal, a fim de simular um fenômeno dinâmico. A representação espacial SIG é o ambiente ou *locus* em que os agentes autônomos do modelo SBA irá operar.

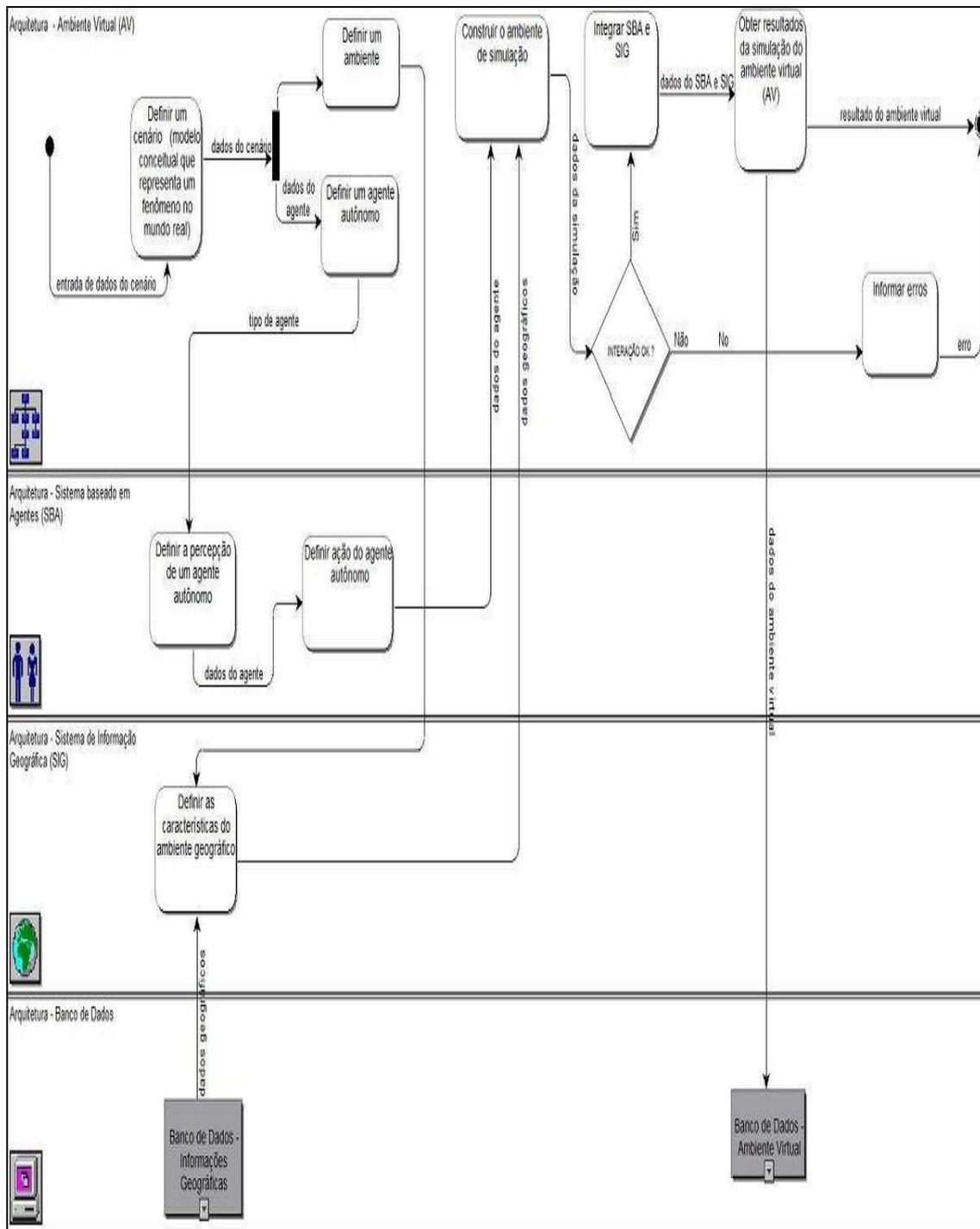


Figura 9 - A arquitetura de um ambiente virtual (AV)

Para cada fenômeno particular, haverá interesse apenas em informações específicas sobre o meio ambiente. Assim, considerando o espaço geográfico onde o fenômeno se desenvolve, é necessário filtrar apenas os aspectos de interesse ao estudo, isto é, aquelas características que irão integrar o ambiente como vistas/percebidas pelos

agentes autônomos e onde todos os processos serão simulados. A utilização de camadas (layers) no SIG, cada uma delas representando diferentes elementos (serviços públicos, rios, lagos, rodovias etc.), permite a filtragem daquelas que são de interesse para o estudo. Objetos que não são de interesse devem ser eliminados. Um ambiente cheio de objetos supérfluos complicaria desnecessariamente a modelagem e reduziria a sua eficácia. Então, dependendo do problema, é necessário simplificar consideravelmente a simulação, como foi feito na arquitetura proposta (DE ALMEIDA SILVA ; FARIAS, 2009; FARIAS ; SANTOS, 2005).

Em modelos espaciais dinâmicos, em particular os modelos que utilizam agentes autônomos (LIM et al, 2002) é comum representar-se o espaço como uma estrutura baseada em células ou *raster* (VELDKAMP ; FRESCO, 1996; VERBURG et al, 2002; SOARES FILHO ; CERQUEIRA, 2002; LIM et al, 2002). O fluir do tempo é caracterizado incrementando-se uma variável t (cada incremento corresponde a um ciclo de simulação). No início da simulação ($t = t_0$), o sistema será inicializado com todos os dados que descrevem o fenômeno ou processo em estudo como visto no estado $t = t_0$. Então, a simulação, propriamente dita, tem início (Figura 10).

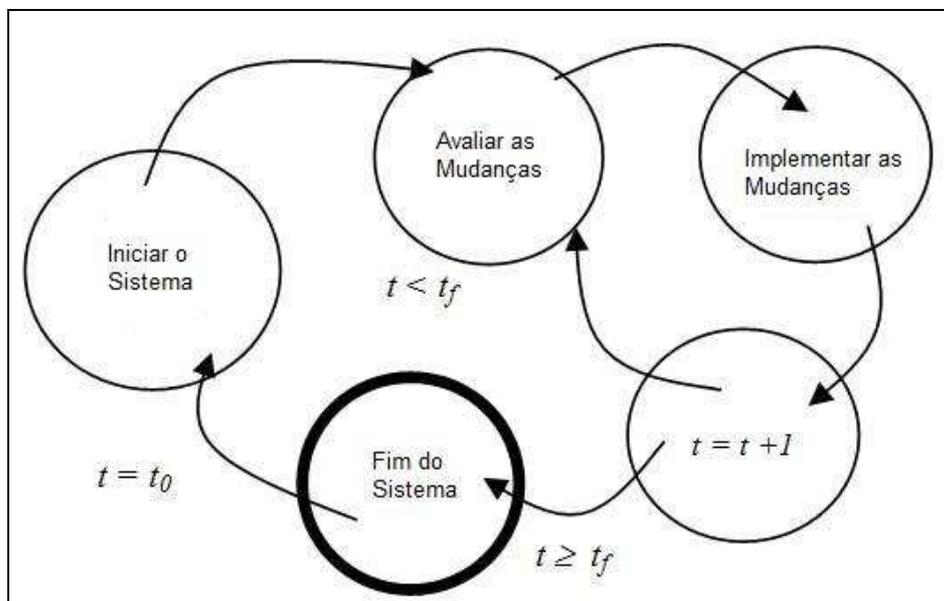


Figura 10 - Estrutura comum de modelos espaciais dinâmicos

Na primeira etapa, deve-se analisar, dada algumas entradas e/ou uma configuração especial de células, quais as células que devem ter seus atributos alterados. Na segunda etapa, algumas regras são aplicadas sobre a estrutura celular, de modo a alterá-la. Na terceira etapa, a variável t é incrementada; se esta variável t é inferior a um

valor t_f pré-determinado - que representa o tempo total da simulação - a simulação retorna à primeira etapa e todo o ciclo se repete; caso contrário a simulação termina.

Esta estrutura de modelos espaciais dinâmicos pode ser adaptada para os Sistema Baseados em Agentes (SBA) para representar os ciclos iterativos, durante os quais o conhecimento sobre o meio ambiente é adquirido (em outras palavras, sentido e percebido) pelos agentes que irão, então, agir em conformidade com estes *inputs*.

O uso de SIG permite uma representação espacial mais precisa do ambiente no qual os agentes autônomos atuarão, representando assim os processos elementares que existem no mundo real. O desafio é construir, para cada problema, uma simulação que permita a geração de dados apropriados para uma análise do fenômeno em estudo.

O uso de orientação a objetos (OO) representa uma nova perspectiva para a integração de sistemas de informação geográfica (SIG) com sistemas baseados em agentes (SBA). Esta tecnologia permite a criação de objetos que podem representar as entidades existentes no mundo real em um ambiente de simulação. As propriedades (atributos e métodos) das entidades em OO, modularização, a facilidade de programação e reutilização são características que dão uma grande flexibilidade para modelar os processos complexos existentes (GIMBLETT, 2002).

Orientação a objetos (OO) é uma tendência mundial em termos de programação e desenvolvimento de sistemas. Aplicada à área de bancos de dados, o conceito de OO permite uma definição mais precisa de modelos e estruturas de dados que melhor representam o mundo real. Isto é especialmente útil para SIG's, uma vez que as informações que eles manipulam, devido às suas características espaciais, são difíceis de modelar usando técnicas tradicionais anteriores a OO.

A construção de um sistema que represente um ambiente virtual é possível graças aos princípios da orientação a objetos (OO). Os objetos construídos seguindo estes princípios fornecem uma representação do mundo real através de software de simulação.

Os dois conceitos fundamentais da OO são classes e objetos. Um objeto é uma entidade que tem atributos e uma identidade. Uma classe é uma abstração de objetos que compartilham características similares, porém essas características podem assumir valores diferenciados para cada objeto. Nesse sentido uma classe é um *template*, a partir do qual são instanciados objetos de um mesmo tipo. Usualmente as classes apresentam uma relação hierárquica, em que subclasses herdam o comportamento derivado de classes mais gerais (Figura 11). OO quando aplicada a SIG's leva à criação de classes

que representam objetos espaciais e que são armazenados em bancos de dados geográficos ou espaciais. Esses bancos de dados permitem o armazenamento, recuperação e manipulação de dados espaciais, incluindo atributos descritivos que formam a base para a representação geométrica de um espaço geográfico (ELMASRI; NAVATHE, 1994).

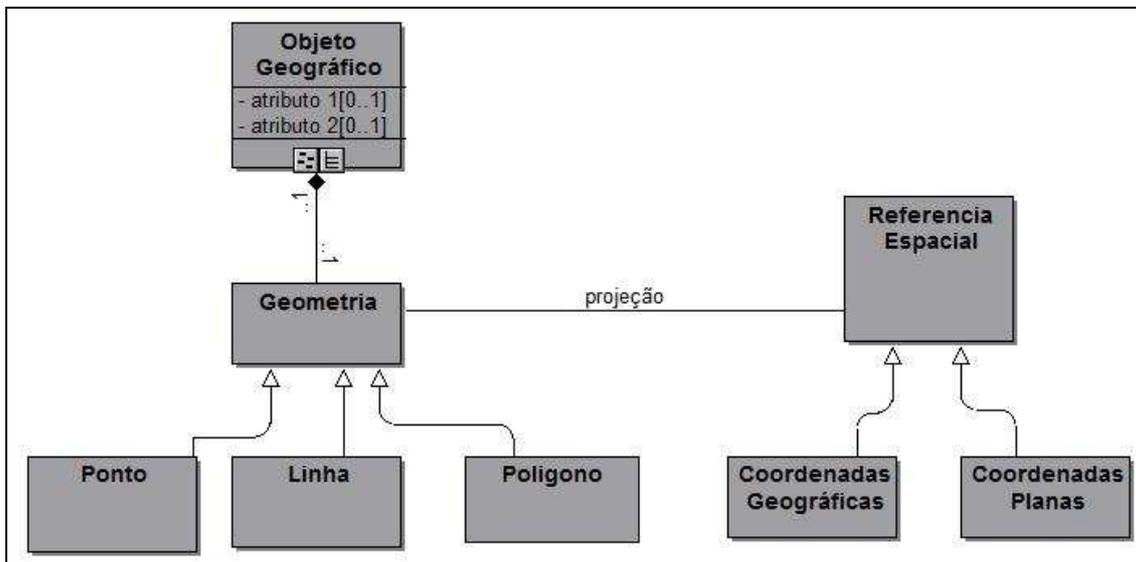


Figura 11 - Diagrama de classes de orientação de objetos-geográficos

Objetos são códigos de programação que podem representar entidades do mundo real (pessoas, animais, células, insetos, produtos químicos, veículos etc.) com seus atributos (características) e comportamento (métodos). Uma das características fundamentais de um objeto é a sua identidade (o que o distingue de outros objetos). Incorporados em um ambiente, os objetos são capazes de simular um fenômeno através de suas múltiplas interações. A aplicação de um pequeno número de regras e leis para entidades (objetos) em um determinado espaço dá origem aos chamados sistemas emergentes, que são capazes de simular complexos fenômenos globais, como o tráfego de veículos, o crescimento das cidades etc. Estes são sistemas em que a combinação de objetos e sua interação com o meio ambiente reproduzem o fenômeno analisado. Os objetos contidos nesses sistemas podem ser adaptáveis e agir com sinergia entre si. Sistemas construídos com objetos, agentes autônomos e uma representação adequada do espaço permitem aos pesquisadores explorar, analisar e prever os processos críticos em estudo.

Um maior grau de realismo em simulações baseadas em agentes autônomos pode ser alcançado através da integração das tecnologias de sistemas baseados em

agentes, sistemas de informação geográfica e aquisição de dados via satélite. Em outras palavras, os ambientes virtuais em que os agentes autônomos atuarão pode ser bidimensional (mapas digitais) ou tridimensional (modelos de elevação digital), que retratam a realidade com um alto grau de precisão, como pode ser observado através de ferramentas como o *Google MapsTM* (GOOGLE, 2011; GIMBLETT, 2002; LONGLEY ; BATTY, 2003). Assim, é possível alcançar um modelo do ambiente, onde os agentes autônomos com seus atributos correspondentes e comportamentos serão posicionados e irão interagir uns com os outros e com o ambiente, simulando processos ou fenômenos dinâmicos.

5.4 Modelo proposto para o ambiente virtual

Após uma liberação acidental de radionuclídeos para a atmosfera, levando a contaminação de grandes áreas geográficas, é necessário a utilização de um método ágil e detalhado capaz de efetuar uma avaliação da exposição da população para identificar as consequências radiológicas da situação e dar suporte e aperfeiçoar decisões relativas à sua proteção (VINHAS, 2004).

Para esse fim, foram elaborados modelos matemáticos capazes de avaliar o impacto ambiental de liberações acidentais de radionuclídeos e avaliar as consequências de contaminação em áreas urbanas. Nesta tese, estes modelos matemáticos são usados, integrados a ambientes virtuais e modelos baseados em agentes, para a simulação de acidentes radiológicos e auxílio no processo de tomada de decisão, quando da ocorrência de um acidente ou emergência nuclear ou radioativa. Podem ser denominados, simplificadamente, de ambientes virtuais para a simulação de acidentes radiológicos e nucleares (AVSAR). O modelo do AVSAR proposto considera: blindagem, característica do material radioativo (meia vida), tempo de exposição, dispersão na atmosfera, distância da fonte, acidente em usina nuclear ou acidente radiológico. Os dados de entrada do modelo são: número de pessoas, posição geográfica da fonte, posição geográfica das pessoas, atividade da fonte radioativa, tempo de exposição, blindagem, dispersão na atmosfera. Os dados de saída do modelo são: taxa de dose absorvida das pessoas, áreas contaminadas, zonas de exclusão, impacto social (escolas, moradias etc.) e impacto ambiental (rios, solos cultiváveis).

5.4.1 Descrição do modelo matemático

Para a determinação da dose recebida por indivíduos é necessário levar em consideração a intensidade da fonte radioativa, sua exata distância dos indivíduos expostos, à existência de blindagem entre a fonte radioativa e as pessoas expostas e o tempo de exposição destas pessoas.

Existem quatro grandezas utilizadas para determinação da radiação: Atividade, Taxa de Exposição, Dose Absorvida e Dose Equivalente.

i) Atividade de uma fonte radioativa

A atividade de uma fonte radioativa é caracterizada pelo número de desintegrações nucleares ou transformações que ocorrem em um determinado intervalo de tempo. A atividade é proporcional ao número de átomos excitados que existem em um elemento radioativo e pode ser expresso pela fórmula:

$$A = A_0 e^{-\lambda \cdot t} \quad (1)$$

Onde : A_0 , é a atividade no tempo $t=0$, e λ é a constante de desintegração, que representa a taxa na qual a desintegração ocorre.

A unidade do Sistema Internacional para a atividade é becquerel (Bq), que indica o decaimento ou desintegração do material radioativo ocorrido em 1 segundo. O becquerel é uma unidade pequena. Em situações práticas, a radioatividade é quantificada em kilobecquerels (kBq) ou megabecquerels (MBq). O curie (Ci) é, também, comumente usado como unidade para atividade em determinados tipos de fontes. O curie é a quantidade de material radioativo no qual $3,7 \times 10^{10}$ átomos são desintegrados por segundo. Isto é, aproximadamente, a quantidade de radioatividade emitida por 1 grama de Ra ²²⁶.

ii) Exposição

A Exposição é a medida da intensidade do campo radioativo em um determinado ponto do ar. É a medida de ionização das moléculas em uma massa de ar. É comumente definida como a quantidade de carga produzida em uma unidade de massa de ar, quando a interação dos fótons for completamente absorvida nesta massa. Deste modo, a unidade de medida de exposição é o Coulomb/kg. A exposição radioativa é associada com o efeito da radiação produzida nos seres vivos. A unidade mais comumente usada para a taxa de exposição é o Roentgen (R).

A taxa de exposição é definida como a variação da exposição no tempo, usualmente medida em Roentgens² por hora (R/h). A taxa de exposição pode ser associada ao fator gama de uma fonte radioativa através da seguinte fórmula:

$$X = \Gamma.A / d^2 \quad (2)$$

Onde,

X = taxa de exposição, em R/h (Roentgen / hora)

A = atividade da fonte, em Ci (Curie)

d = distância entre a fonte e o ponto de medida, em metros (m)

Γ = uma constante característica de cada fonte radioativa, também, conhecida como fator gama, em (R.m²) / (h.Ci)

iii) Dose Absorvida

A quantidade básica usada para expressar a exposição sofrida por um material como, por exemplo, o corpo humano, é a dose absorvida. Enquanto a exposição é definida para o ar, a dose absorvida é a quantidade de energia da radiação ionizante incorporada a uma determinada massa de matéria. A unidade Internacional para a dose absorvida é o gray (Gy), que é definida como a dose de um joule por quilograma.

A quantidade de dose absorvida é expressa através de uma fórmula que depende da atividade da fonte radioativa, da distância da fonte e do tempo de exposição a esta fonte:

$$D = X.t \quad (3)$$

Onde,

D = dose absorvida, em Gray (Gy)

X = taxa de exposição, em R/h

t = tempo, em horas (h)

iv) Dose Equivalente

Quando se considera a interação da radiação com tecidos vivos é importante, também, levar em conta o tipo de radiação. Muito embora, os efeitos da radiação sejam dependentes da dose absorvida, alguns tipos de radiação produzem efeitos diferenciados relativamente a outros, que representam a mesma quantidade de energia dissipada. Por exemplo, para idênticas doses absorvidas, as partículas alfa podem ser 20 vezes mais prejudiciais do que a partícula beta. A fim de levar em conta estas variações, quando se

² Roentgen é a quantidade de radiação necessária para liberar cargas positivas e negativas de uma unidade de carga electrostática (StatCoulomb) em um centímetro cúbico de ar seco, à temperatura e pressão padrão (STP). Isto corresponde à geração de aproximadamente $2,0819 \times 10^9$ pares de íons.

descreve os riscos a saúde humana provocado pela exposição à radiação, uma grandeza denominada dose equivalente (DE) é usada. Ela é a dose absorvida multiplicada por um fator de ajuste ou qualidade, que indica o dano biológico potencial que um determinado tipo de radiação provoca.

O fator de qualidade (FQ) é usado em radioproteção para valorar a dose absorvida com relação ao seu efeito biológico presumido. Radiação com FQ elevado causará grande dano ao tecido vivo. O rem é um termo usado para descrever uma unidade especial de dose equivalente. Rem é a abreviação de “*roentgen equivalent in man.*”. A unidade do sistema Internacional (SI) é o sievert (Sv); um rem é equivalente a 0,01 Sv. Doses de radiação recebidas por trabalhadores são registradas em rem, no entanto, sievert tem sido usado como uma transição industrial para o Sistema Internacional de Unidades.

$$DE = D.FQ \quad (4)$$

Onde,

DE = dose equivalente, em Sievert (Sv)

D = dose absorvida, em Gray (Gy)

FQ = fator de qualidade da radiação, para radiação gama é igual a 1

Distância, tempo e blindagem são fatores que influenciam na dose recebida por uma pessoa.

A distância indica que quanto mais um indivíduo estiver afastado de uma fonte radioativa, menos radiação receberá. O tempo indica que quanto mais tempo ficar exposto a uma fonte radioativa mais radiação receberá. É essencial que se exerça o mais rapidamente possível qualquer ação junto à fonte, a fim de que o tempo de exposição à mesma não seja elevado. A blindagem indica que, dependendo do material utilizado, tais como chumbo, ferro, concreto, é possível diminuir a exposição à radioatividade do corpo humano.

É desejável que, através de simulação, identifique-se a fonte radioativa, as áreas contaminadas, a quantidade de pessoas irradiadas, a quantidade de pessoas que recebeu significativa dose e as zonas de exclusão. Portanto, através do AVSAR se poderá formar um sistema de resposta capaz de minimizar as consequências de um acidente radiológico, bem como aumentar a capacidade de gerência do risco envolvido. O AVSAR dará suporte à tomada de decisão quanto aos procedimentos mais urgentes de descontaminação e de proteção da população.

Contudo, em determinados casos, não é possível determinar com exatidão quais são as pessoas que foram expostas, tampouco o seu número exato. Este seria o caso, por exemplo, de um hipotético ataque terrorista com uma fonte radioativa em um sistema público de transporte (trem ou metrô). Não obstante, é muito importante para o sistema público de saúde ter-se uma estimativa de pessoas envolvidas e a dose efetiva que receberam, com o objetivo de calcular os recursos médicos que serão necessários para enfrentar o problema, para prevenir a população dos riscos da exposição e, também, para gerenciar o evento como um todo: procedimentos de descontaminação, acondicionamento de rejeitos, infraestrutura para suporte de equipes de emergência etc.

O AVSAR, também, seria útil na simulação dos riscos associados com o transporte de fontes radioativas em áreas urbanas. Neste caso, pode-se escolher a melhor rota, e, em caso de acidente radiológico, identificar qual seria a rota que contaminaria o menor número de pessoas e qual a que causaria menos impacto ao meio ambiente e à sociedade.

O modelo implementado no AVSAR baseia-se na fórmula de exposição radioativa (equação 2), levando em conta o radionuclídeo e sua atividade, a distância das pessoas expostas ao elemento radioativo, o tempo de exposição, como também, possíveis blindagens. Considera, também, o deslocamento das pessoas representado por agentes autônomos do tipo reativo. O efeito da blindagem pode, da mesma forma, ser incorporado ao modelo. Basta, na equação 2, incluir-se um fator $0 \leq k \leq 1$, que dependerá do tipo e da espessura do material utilizado como blindagem.

$$X = k \cdot \Gamma \cdot A / d^2, 0 \leq k \leq 1 \quad (5)$$

Tanto as fontes radioativas como as pessoas serão representadas no AVSAR por agentes autônomos. O agente que simula a fonte radioativa tem as seguintes variáveis de estado: i) O identificador de fonte; ii) sua posição, dada por um conjunto de coordenadas (x, y, z); iii) sua atividade A; iv) O fator Γ para a fonte específica; v) O fator de qualidade (FQ) usado para valorar a dose absorvida com relação aos efeitos biológicos presumidos. Um agente típico representativo de uma pessoa possui o seguinte conjunto de variáveis de estado: i) a identificação de pessoa; ii) sua posição, dada por um conjunto de coordenadas (x, y, z); iii) tempo de exposição; iv) efeitos de blindagem; v) a dose absorvida; vi) a dose equivalente.

5.4.2 Modelo matemático de dispersão de pluma

Muitos dos acidentes nucleares/radiológicos, devido à sua magnitude, provavelmente só possam ser adequadamente simulados em uma macroescala. As consequências para a sociedade são imensas, como demonstrado nos acidentes de Chernobyl e Fukushima e , por isso, foram classificados na categoria 7 da escala INES (IAEA, 2008).

Dentro deste contexto, uma abordagem importante, na simulação de acidentes radiológicos/nucleares, é a análise da dispersão da pluma radioativa.

A elaboração teórica de modelos matemáticos de dispersão foi iniciada em 1932 por P. Sutton na Inglaterra, e completada até 1950 por seus dados experimentais com fontes reais, servindo de base ainda hoje para desenvolvimentos de sistemas modernos. Paquill (PAQUILL, 1968) idealizou um tratamento modificado que é um dos mais utilizados na prática. Já Turner (TURNER,1994) desenvolveu novas aplicações e apresentou gráficos muito úteis para a solução de problemas específicos.

Existem três grandes grupos de modelos de dispersão atmosférica:

1-Modelo de Pluma Gaussiana.

2-Modelos Para Gases Pesados.

3-Modelos Numéricos a três dimensões.

Modelo de pluma Gaussiana e equação de convecção-difusão são usadas na mesoescala atmosférica (ORLANSKY, 1975) em distâncias da ordem de 2 a 2.000km da central nuclear. Estes modelos não levam em conta velocidade do vento, condições atmosféricas, relevo, edificações no entorno etc. que exigiriam um modelo mais robusto. Para modelos mais complexos utiliza-se a Multiescala Variacional (VMS) e Simulação de Grandes Escalas (LÊS). Utiliza-se as equações de Navier-Stokes (DE SAMPAIO, 2005) de modelo de fluidodinâmica computacional (CFD) em tais casos. Estes modelos têm suas limitações e não podem fornecer respostas a todas as perguntas, porém têm o mérito de dar suporte à reflexão e, em linhas gerais, às diretrizes para um problema tão complexo e difícil de equacionar. Portanto, os resultados dos cálculos devem ser utilizados sempre com certo cuidado. No tratamento clássico é assumido que a nuvem se move na direção do vento e vai se misturando e diluindo com o ar devido à turbulência: o gás ou vapor é suposto como tendo densidade próxima a do ar, de modo que não existiria a influência da força gravitacional. O

problema não está totalmente resolvido para o caso em que a diferença de densidades é tão grande que a força gravitacional não possa ser desprezada, mas a difusão molecular é baixa e pode ser ignorada.

Os modelos Gaussianos permitem calcular, em qualquer ponto do espaço tridimensional, o valor da concentração de poluente em função da quantidade do produto emitido (instantaneamente ou vazão contínua), da altura da liberação, da velocidade do vento e da estabilidade atmosférica. Esses modelos são muito simples e necessitam de pouco tempo de máquina. Expressam a concentração média em qualquer ponto na direção do vento, a partir de uma fonte de emissão contínua estacionária. São bem adequados para avaliações preliminares ou expeditas, e nos casos de emissões tóxicas de pequena quantidade. Restringem-se a situações com terreno plano sem obstáculos, gases com a mesma densidade do ar etc. Suas limitações levaram à busca de modelagens mais realistas e precisas, que, no entanto, não serão consideradas no modelo proposto.

O modelo de dispersão da pluma radioativa analisado é o Gaussiano, utilizando a seguinte equação de dispersão atmosférica em sítios de usinas nucleares (RIBEIRO ; COELHO, 2008):

$$\frac{\chi(x, y, z; H)}{Q} = \frac{1}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (6)$$

Onde:

χ = Concentração de radionuclídeo em Curie por unidade de volume ($\text{Ci}\cdot\text{m}^{-3}$)

Q = Taxa de emissão de radionuclídeo em Curie por unidade de tempo ($\text{Ci}\cdot\text{s}^{-1}$)

u = Velocidade do vento no ponto de emissão ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

σ_y = Desvio padrão da distribuição da concentração na direção y

σ_z = Desvio padrão da distribuição da concentração na direção z

π = Constante matemática igual a 3,1415926...

H = Altura efetiva da pluma

A partir da concentração dos radionuclídeos no ar, pode-se estimar a dose efetiva comprometida devido à inalação utilizando a seguinte equação (CONTI, 2002):

$$E_{ina} = \sum C_{a,i} \cdot CF_{2,i} \cdot T_e \quad (7)$$

Onde:

E_{ina} = Dose efetiva comprometida devido à inalação (mSv)

$C_{a,i}$ = Concentração média do radionuclídeo i no ar ($\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$)

$CF_{2,i}$ = Fator de conversão para o radionuclídeo i .

($\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1} / \text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$); uma taxa de inalação de $1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ é considerada, conforme recomendação do ICRP para um adulto executando atividades leves.

T_e = Tempo de exposição (h)

Desse modo, pode-se estimar a dose efetiva para um indivíduo situado na coordenada (x, y, z) relativamente a um referencial R situado na chaminé de onde emana a pluma, conforme mostrado na Figura 12. Eis as características do referencial R - coordenadas da origem de R relativamente a outro referencial serão as mesmas da base da chaminé de onde emana a pluma. O eixo X será paralelo à direção do vento e o eixo Z, paralelo à chaminé. Ao se aplicar a equação 6, considerando-se outros sistemas de coordenadas, se deverá considerar a respectiva mudança de coordenadas relativa aos referenciais em questão.

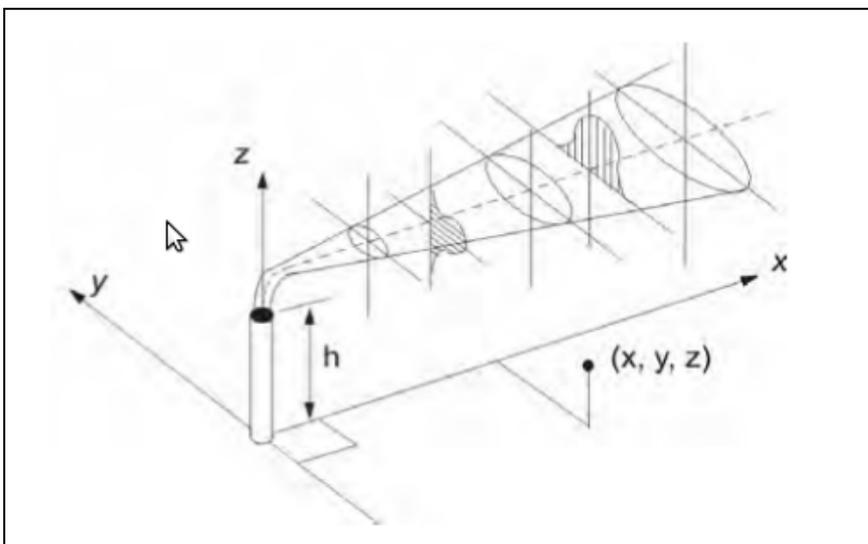


Figura 12 – Dispersão da pluma

Fonte: RIBEIRO ; COELHO, 2008

Para a determinação da posição geográfica da pluma é preciso utilizar os conceitos de transformação de coordenadas, tendo em vista que o sistema de coordenadas da chaminé (o Datum utilizado) é um e o seu referenciamento em

coordenadas geodésicas é outro (outro Datum). Utiliza-se, para isso, sistemas de referências, que são utilizados para descrever as posições de objetos.

“Uma transformação é uma operação por meio da qual uma relação, expressão ou figura é mudada de acordo com uma dada lei. Analiticamente a lei dada é expressa por uma ou mais equações denominadas equações de transformação. Para se chegar a uma solução basta exprimir os valores das coordenadas de um ponto genérico no sistema particular, em função das coordenadas do mesmo ponto no novo sistema, a partir de uma determinada lei de transformação” (DE SOUSA, 2007). Dois conceitos são representativos de uma transformação: a translação e a rotação.

Na translação de eixos coordenados em 2D (bidimensional) “mudamos a origem e conserva-se as direções e os sentidos destes eixos (Figura 13). Sejam XOY o sistema particular e X'O'Y' o novo sistema. O novo sistema X'O'Y', percebe-se facilmente, que é definido, em relação ao primeiro, pelas coordenadas h e k da origem O' e pela condição $O'X'$ e $O'Y'$ serem, respectivamente, paralelos e do mesmo sentido que OX e OY ” (DE SOUSA, 2007).

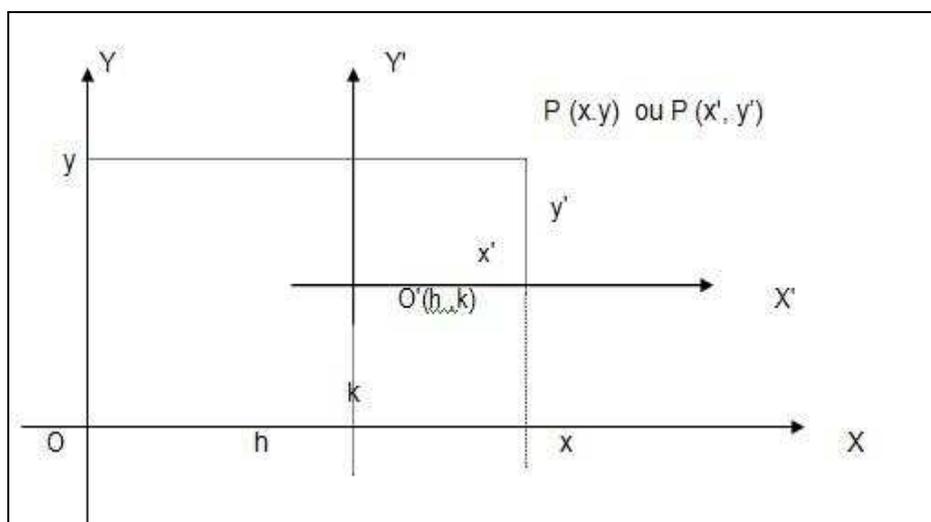


Figura 13 – Translação em 2D
Fonte: DE SOUSA, 2007

Então, $\begin{cases} x = x' + h \\ y = y' + k \end{cases}$ (8) é a fórmula de mudança do sistema XOY para X'O'Y'

e $\begin{cases} x' = x - h \\ y' = y - k \end{cases}$ (9) é a fórmula de mudança do sistema X'O'Y' para o XOY

Já na rotação de eixos em 2D (bidimensional) (Figura 14), muda-se a direção dos eixos sem mudar a origem.

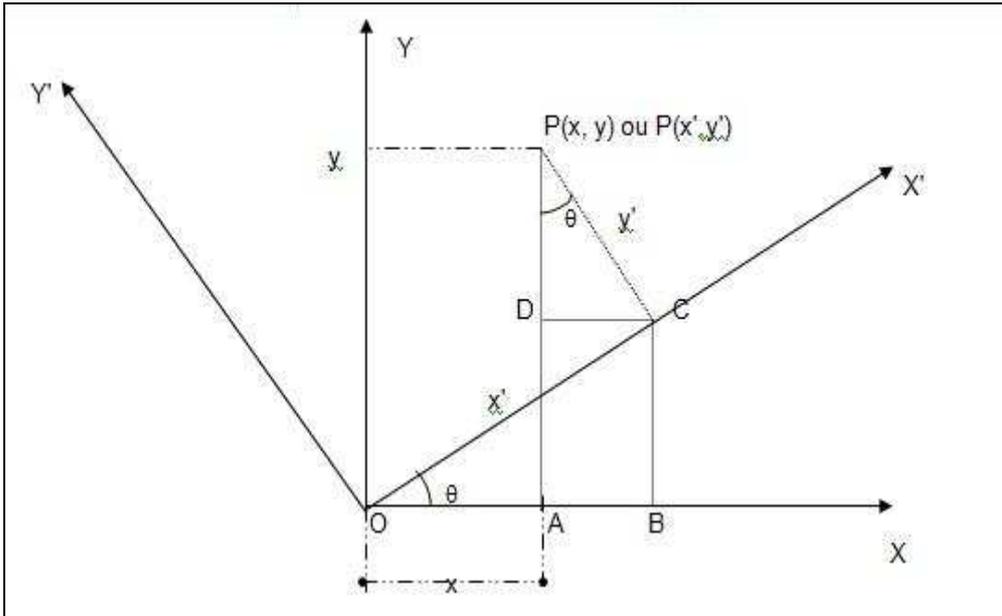


Figura 14 – Rotação em 2D
Fonte: DE SOUSA, 2007

“Seja o sistema XOY, através de uma rotação dos eixos de um ângulo θ , mantendo a mesma origem, obtém-se um novo sistema X'O'Y'” (DE SOUSA, 2007).

Mudança do sistema XOY para o sistema X'O'Y': dos triângulos OBC e PDC, pode-se dizer que (DE SOUSA, 2007):

$$\begin{cases} x = OA = OB - AB \\ y = AP = AD + DP \end{cases}, \text{ e que,}$$

$$OB = x' \cos \theta, \quad AB = DC = y' \sin \theta, \quad AD = BC = x' \sin \theta, \quad DP = y' \cos \theta$$

Substituindo, tem-se (DE SOUSA, 2007):

$$\begin{cases} x = x' \cos \theta - y' \sin \theta \\ y = x' \sin \theta + y' \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

Mudança do sistema X'O'Y' para o sistema XOY: procedendo do mesmo modo obtém-se (DE SOUSA, 2007):

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' = x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad (11)$$

As transformações em 3D (tridimensional) são uma extensão dos métodos em 2D (bidimensional). Pode-se representar os pontos em 2D e 3D sob a forma de vetores em colunas (AIRES, 2010). Por exemplo:

$P(x, y)$ e $Q(x, y, z)$

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \text{ e } Q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Portanto, a translação em 2D, sob a forma de vetor, seria representada por:

$$\begin{cases} x' = x + t_x \\ y' = y + t_y \end{cases} \quad P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$P' = P + T$$

Já a translação em 3D, sob a forma de vetor, é representada por:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

Também, pode-se representar a translação de um ponto $P(x, y, z)$ para um ponto $P'(x', y', z')$ (Figura 15), através de uma operação de matriz (coordenadas homogêneas), ficando (AIRES, 2010):

$$P' = T \cdot P$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

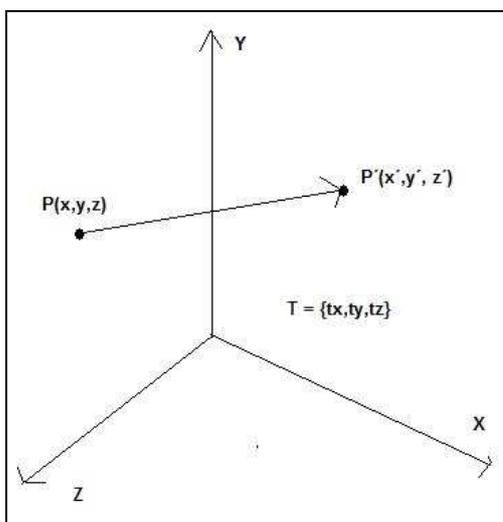


Figura 15 – Translação em 3D

No que diz respeito à rotação em 3D, pode-se ter o eixo com várias orientações espaciais (Figura 16).

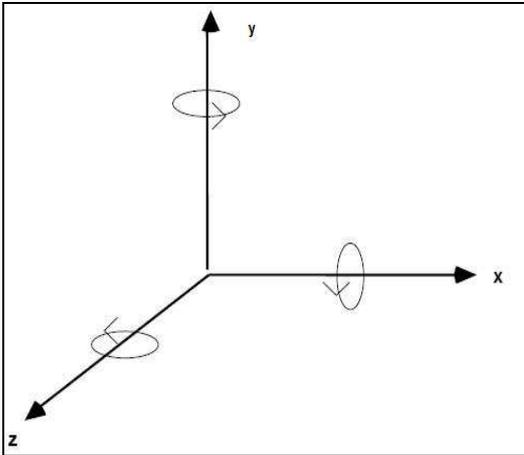


Figura 16 – Rotação em 3D

Para a rotação 3D em torno do eixo Z, tem-se (AIRES, 2010):

$$P' = R_z(\theta) \cdot P$$

$$\begin{aligned} x' &= x \cos(\theta) - y \sin(\theta) \\ y' &= x \sin(\theta) + y \cos(\theta) \\ z' &= z \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Para a rotação 3D em torno do eixo X, tem-se (AIRES, 2010):

$$P' = R_x(\theta) \cdot P$$

$$\begin{aligned} y' &= y \cos(\theta) - z \sin(\theta) \\ z' &= y \sin(\theta) + z \cos(\theta) \\ x' &= x \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Para a rotação 3D em torno do eixo Y, tem-se (AIRES, 2010):

$$P' = R_y(\theta) \cdot P$$

$$\begin{aligned} z' &= z \cos(\theta) - x \sin(\theta) \\ x' &= z \sin(\theta) + x \cos(\theta) \\ y' &= y \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Analisando, agora, a identificação da posição de uma determinada informação na superfície da Terra é necessário utilizar os Sistemas de Referência Terrestres ou

Geodésicos. Estes por sua vez, estão associados a uma superfície que mais se aproxima da forma da Terra, e sobre a qual são desenvolvidos todos os cálculos das suas coordenadas. As coordenadas podem ser apresentadas em diversas formas: em uma superfície esférica recebem a denominação de coordenadas geodésicas e em uma superfície plana recebem a denominação da projeção às quais estão associadas, como por exemplo, as coordenadas planas UTM (IBGE) (BRYS, 2005).

As coordenadas referidas aos Sistemas de Referência Geodésicos são normalmente apresentadas em três formas: cartesianas, geodésicas(ou elipsoidais) e planas (BRYS, 2005).

“Um sistema coordenado cartesiano no espaço 3-D é caracterizado por um conjunto de três retas (x,y e z), denominados de eixos coordenados, mutuamente perpendiculares. Ele associado à um Sistema de Referência Geodésico, recebe a denominação de Sistema Cartesiano Geodésico(CG) de modo que (Figura 17):

- O eixo X coincidente ao plano equatorial, positivo na direção de longitude 0°;
- O eixo Y coincidente ao plano equatorial, positivo na direção de longitude 90°;
- O eixo Z é paralelo ao eixo de rotação da Terra e positivo na direção norte.
- Origem : Se está localizada no centro de massas da Terra (geocêntrico), as coordenadas são denominadas de geocêntricas, usualmente utilizadas no posicionamento à satélites, como é o caso do WGS84.” (BRYS, 2005)

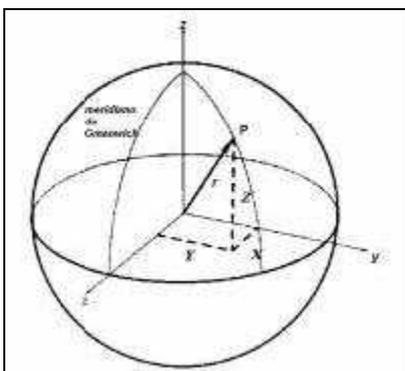


Figura 17 – Sistema de coordenadas cartesianas
Fonte:BRYS,2005

“Independente do método utilizado para se representar ou projetar uma determinada superfície no plano, deve-se adotar uma superfície que sirva de referência, garantindo uma concordância das coordenadas na superfície esférica da Terra. Com este

propósito, deve-se escolher uma figura geométrica regular, muito próxima da forma e dimensões da Terra, a qual permite, mediante a um sistema coordenado, posicionar espacialmente as diferentes entidades topográficas. Esta figura recebe à denominação de elipsóide e as coordenadas referidas a ele são denominadas de latitude e longitude geodésicas.” (BRYS, 2005)

“As coordenadas referidas a um determinado Sistema de Referência Geodésico, podem ser representadas no plano através nas componentes Norte e Leste e são o tipo de coordenadas regularmente encontrado em mapas. Para representar as feições de uma superfície curva em plana são necessárias formulações matemáticas chamadas de Projeções Cartográficas. Diferentes projeções poderão ser utilizadas na confecção de mapas, no Brasil a projeção mais utilizada é a UTM (Universal Transversa de Mercator).” (BRYS, 2005)

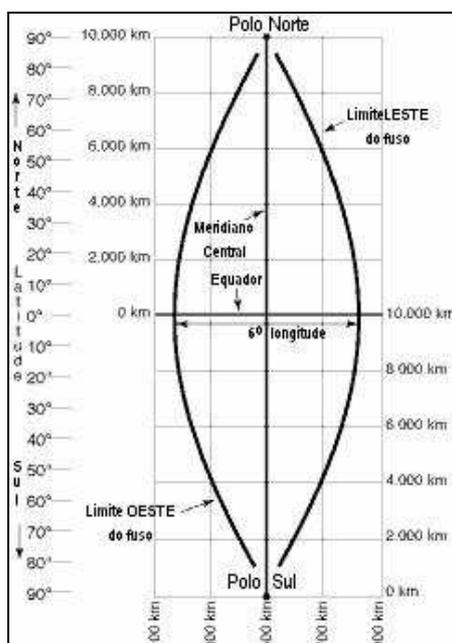


Figura 18 – Fuso do sistema UTM
Fonte: BRYS,2005

Para se realizar a transformação de coordenadas (N, E, elev), ou seja, (latitude, longitude, altura) que são visualizadas no Google EarthTM e que têm como sistema de referência o referencial WGS84 (geodésico), para o referencial cartesiano R, relativamente ao qual foi elaborada a equação de dispersão da pluma radioativa, deverão ser aplicados alguns passos intermediários (Figura 19). Em primeiro lugar será preciso efetuar a conversão das coordenadas geodésicas (N – lat, L – long, Elev – altura) fornecidas pelo Google EarthTM e relativas ao referencial WGS84, para o referencial de

coordenadas cartesianas de origem no centro de massa da Terra (Terra-centro, Terra-fixo-ECEF ou coordenadas ECF) ou (X, Y, Z).

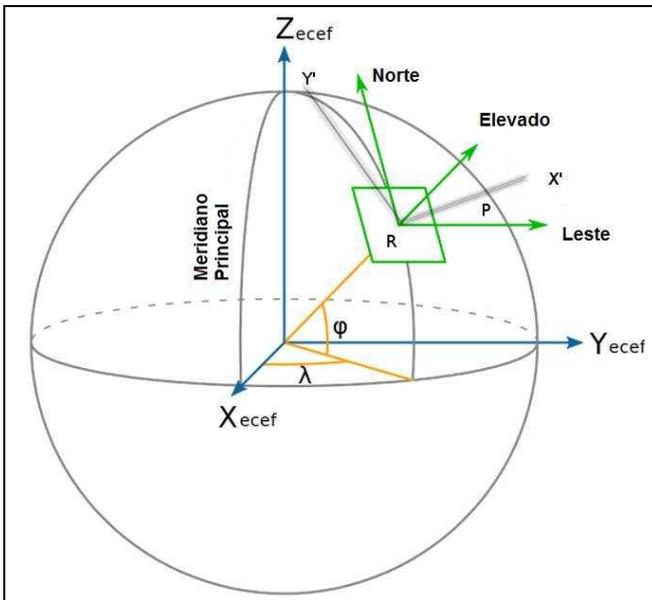


Figura 19 – Referenciais da pluma (X', Y', Up), ENU ou topocêntrico (Leste, Norte, Elevado), ECEF (X, Y, X) e WGS-84 (λ , ϕ , h)

Fonte: WIKIPEDIA, 2007

Observe que o referencial cartesiano R, relativamente ao qual foi deduzida a equação da pluma radioativa, é definido por: eixo Z', origem na base da chaminé de onde emana a pluma radioativa e direção coincidindo com a chaminé, a qual é perpendicular à superfície da terra no local – forma, portanto, um ângulo de $90 - \phi$ com o eixo Z_{ecef} do sistema de coordenadas geodésico e geocêntrico; eixo X' – origem na base da chaminé paralelo à direção do vento no local onde se situa a chaminé; eixo Y' – origem na base da chaminé, formando um ângulo de 90 graus no sentido contrário ao fluxo dos ponteiros do relógio com o eixo X' e também perpendicular a Z'. Registre-se que o eixo X' formará um ângulo ρ - indicativo da direção do vento - com o eixo Leste do referencial cartesiano (Leste, Norte, Elevado) ou (U, V, W), cujo plano formado pelos eixos (Leste, Norte) ou (U, V) é o plano local geodésico ou plano tangente local. O eixo Elevado(W), portanto, coincide com a chaminé e é idêntico a Z'. A origem do referencial (U, V, W) no sistema de coordenadas ECF é dado por (X_0, Y_0, Z_0) .

As coordenadas geodésicas (latitude, longitude, altura) podem ser convertidas em coordenadas ECEF utilizando a seguinte fórmula:

$$\begin{aligned} X &= (N(\phi) + h) \cos \phi \cos \lambda \\ Y &= (N(\phi) + h) \cos \phi \sin \lambda \\ Z &= (N(\phi)(1 - e^2) + h) \sin \phi \end{aligned} \quad (18)$$

onde,

$$N(\phi) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

Note que a e e são o semi-eixo maior e a primeira excentricidade numérica do elipsóide, respectivamente. $N(\phi)$ é chamado o normal e é a distância a partir da superfície para o eixo Z, ao longo da normal do elipsoide (WIKIPEDIA, 2007).

Em segundo lugar, será necessário efetuar-se a conversão das coordenadas relativas ao referencial ECEF para o referencial cartesiano (Leste, Norte, Elevado) ou ENU ou Topocêntrico, cujo plano formado pelos eixos (Leste, Norte) é o plano local geodésico ou plano tangente local à superfície da Terra no ponto em que se localiza a chaminé de onde emana a pluma radioativa. Note-se que os eixos XEcef e Leste formam um ângulo de $900-\lambda$. A conversão de coordenadas ECEF para ENU pode ser realizada da seguinte fórmula (Zinn, 2011):

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \\ \cos \phi \cos \lambda & \cos \phi \sin \lambda & \sin \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$U = -(X-X_o) \sin \lambda + (Y-Y_o) \cos \lambda$$

$$V = -(X-X_o) \sin \phi \cos \lambda - (Y-Y_o) \sin \phi \sin \lambda + (Z-Z_o) \cos \phi$$

$$W = (X-X_o) \cos \phi \cos \lambda + (Y-Y_o) \cos \phi \sin \lambda + (Z-Z_o) \sin \phi$$

Observe-se que X / Y / Z são traduzidos e girados da origem geocêntrica para a origem oblíqua para criar U / V / W (ou Leste / Norte / Elevado), também conhecida como coordenadas topocêntrica, primeiro como uma matriz de expressão, em seguida, os equivalentes escalares (Zinn, 2011).

Por fim, deve-se efetuar a transformação de coordenadas do referencial topocêntrico (U, V, W) para o referencial da pluma radioativa R. O referencial R sofre uma rotação dos eixos X e V, para X', Y' de um ângulo ρ , como mostrado na fórmula abaixo:

$$\begin{aligned} x' &= u \cos(\rho) - v \sin(\rho) \\ y' &= u \sin(\rho) + v \cos(\rho) \\ z' &= w \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\rho) & -\sin(\rho) & 0 & 0 \\ \sin(\rho) & \cos(\rho) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Todas estas etapas podem ser realizadas usando-se o software GeotranzTM, uma versão para o sistema operacional UbuntuTM do software Geotrans, desenvolvido pela National Geospatial Intelligence Agency (NGA, 2012).

6 RESULTADOS

6.1 A construção de um ambiente virtual para a simulação de acidentes radiológicos e Nucleares (AVSAR)

Na construção de um ambiente Virtual para a Simulação de Acidentes Radiológicos e Nucleares sugere-se o uso de uma metodologia que consiste nas seguintes etapas:

- 1) A construção de um modelo conceitual que representa o fenômeno no mundo real; levantar questões que devem ser respondidas pela simulação, bem como os possíveis cenários a serem analisados;
- 2) A adoção de um ambiente virtual, ou seja, uma estrutura para representar o espaço, similar ou compatível com a de um SIG, em que diversas camadas temáticas possam ser representadas;
- 3) O planejamento dos serviços do sistema de ambiente virtual;
- 4) A definição de agentes autônomos ou entidades, seus atributos e comportamentos em consonância com o modelo conceitual;
- 5) A definição, eventualmente através de algoritmos, de como os agentes irão interagir entre si e com o meio ambiente, de forma a simular o fenômeno em estudo;
- 6) A definição de variáveis de entrada e saída que permitam a simulação do fenômeno e a análise dos resultados obtidos;

Os fenômenos ou processos a serem tratados no AVSAR serão os acidentes radiológicos e os acidentes nucleares. Para os acidentes radiológicos as equações (1) a (5) descrevem satisfatoriamente o problema, e são equivalentes a um modelo conceitual (etapa 1 da metodologia). Tanto as fontes radioativas como as pessoas serão modeladas por agentes (etapa 4 da metodologia). No caso das fontes radioativas, elas seriam representadas por agentes com os seguintes atributos: i) O identificador de fonte; ii) sua posição, dada por um conjunto de coordenadas (x, y, z) ; iii) sua atividade A ; iv) O fator Γ para a fonte específica; v) O fator de qualidade (FQ), usado para quantificar a dose absorvida com relação aos efeitos biológicos presumidos. Um agente típico representativo de uma pessoa possui o seguinte conjunto de variáveis de estado: i) A

identificação de pessoa; ii) Sua posição, dada por um conjunto de coordenadas (x, y, z); iii) tempo de exposição; iv) Efeitos de blindagem; v) A dose absorvida; vi) A dose efetiva.

Para os acidentes nucleares, o AVSAR partirá do princípio que um modelo Gaussiano de dispersão da pluma radioativa fornecerá a concentração de radionuclídeo em Curie por unidade de volume (Ci.m^{-3}), nas coordenadas (x, y, z) para uma altura efetiva h da pluma radioativa. Assim, pode-se imaginar um agente radioativo em cada posição (x, y, z) do espaço, com suas variáveis de estado correspondendo aos demais parâmetros da equação (6). Os indivíduos expostos à contaminação radioativa da pluma poderão ser representados por agentes com atributos idênticos àqueles usados na simulação de acidentes radiológicos.

O modelo precisa, também, de uma representação do espaço geográfico, o ambiente onde os agentes captam estímulos como *input* e produzem ações como *output* (etapa 2 da metodologia). Para este fim sugere-se o uso dos serviços do *Google Maps*TM e/ou *Google Earth*TM, que fornecem uma funcionalidade equivalente, para os propósitos das simulações, aos sistemas de informações geográficos. Arquivos do tipo *KML* e *KMZ* poderão também ser usados para visualizar informações através de um *browse* que utilize os serviços do *Google Maps*TM e/ou *Google Earth*TM. Arquivos *KML* utilizam um conjunto de *features* (marcadores de posição, imagens, polígonos, modelos em três dimensões, descrições textuais etc.) e, como sistema de referência, coordenadas geográficas em três dimensões: longitude, latitude e altitude, com valores negativos para *oeste* e *sul*. Os valores dos componentes latitude e longitude são definidos pelo World Geodetic System de 1984 (WGS-1984). A altitude é mensurada relativamente ao WGS84, EGM96, Geoid vertical datum (KML, 2012).

Como maior vantagem da adoção dos serviços do *Google Maps*TM e/ou *Google Earth*TM, destaca-se a utilização dos serviços oferecidos pela *Application Program Interface (API)* do *Google Maps*TM. Tornam-se imediatamente disponíveis para os usuários as seguintes facilidades: i) A *Maps JavaScript API*, que permite a inserção de mapas interativos em páginas *web* usando-se a linguagem *JavaScript*; ii) *Web Services*, que compreende uma coleção de requisições URL para se ter acesso a informações sobre *geocoding* (o processo de converter endereços em coordenadas geográficas), *geocoding* reverso, direções, elevações, e locais; iii) A *Places API*, que acessa informações sobre estabelecimentos, localizações geográficas ou pontos de interesse proeminentes; iv) *Maps Image API* – permite a inserção de imagens de mapas

*Google*TM ou *Street View panorama* em páginas *web*, sem a necessidade de se usar *JavaScript*; v) *Google Earth API* – permite a inserção de um globo digital em páginas *web*. Pode-se inserir marcas, linhas, imagens, adicionar modelos em três dimensões, carregar arquivos *KML* (KML, 2012) etc.

Através das facilidades oferecidas pelas diversas *API's* do *Google Maps*TM resolve-se automaticamente a etapa 3 da metodologia - o planejamento dos serviços do sistema de ambiente virtual; Os serviços disponíveis passam a ser todos aqueles oferecidos pelas diversas *API's* citadas acima.

A interação dos agentes entre si e com o meio ambiente é um tema mais sensível (etapa 5 da metodologia), pois, no caso dos sistemas ditos emergentes é a própria interação entre os agentes e o meio ambiente que conduz à formação de estruturas, padrões e propriedades durante o processo de evolução dos sistemas complexos e, como se sabe, os problemas a serem simulados podem variar muito entre si. Há duas estratégias possíveis a seguir, dependendo da complexidade do problema que se tem em mão. A primeira, seria implementar os algoritmos de interação entre os agentes e o meio ambiente diretamente em *JavaScript*, o que traria a vantagem de se visualizar os dados diretamente no *Google Maps*TM e/ou *Google Earth*TM, através de uma das *API's* disponíveis. Esta estratégia seria mais adequada de ser aplicada em problemas em que as interações dos agentes entre si e com o ambiente sejam relativamente simples. A segunda estratégia envolve o uso de *toolkits* especializados na modelagem de sistemas baseados em agentes e que simplificam consideravelmente o processo de criação do modelo e o seu uso. Esta estratégia é quase mandatória no caso dos sistemas ditos emergentes, devido à complexidade dos mesmos. Dentre as ferramentas de *software* usadas para se construir simulações multi-agente destacam-se (ARGONNE, 2011): *Repast*TM, *Cougar*TM, *Zeus*TM, *Jack*TM, *Jade*TM, *Swarm*TM, *Star Logo*TM e *Net Logo*TM.

Nesta tese, o *software* utilizado para a construção de sistemas multi-agentes foi o *Repast*TM (ARGONNE, 2011), pelas seguintes razões :

- 1) Agentes podem ser integrados a informação georeferenciada (SIG);
- 2) Seu código fonte está em *Java*TM, o que torna a ferramenta altamente portátil;
- 3) É uma ferramenta rápida para desenvolvimento de aplicativos (RAD);
- 4) Permite o acompanhamento, tanto da evolução dos agentes autônomos, como do modelo construído;
- 5) Usa gráficos para a saída dos resultados;

- 6) Possui uma interface gráfica amigável para a construção de agentes;
- 7) É uma ferramenta *open source* e que está em constante evolução;
- 8) É compatível com três diferentes linguagens de programação/frameworks: *Java™* (*RepastJ*), *Microsoft.NET™* (*Repast.NET*), e *Python™* (*RepastPy*) (CROOKS, 2007).

Um quesito básico na escolha de um *software* para a construção de sistemas multi-agentes é a sua capacidade de trabalhar com informações georreferenciadas, pois dessa forma os agentes poderão ser representados naturalmente em um espaço geográfico. Em particular, mesmo que sejam necessárias algumas operações de conversão, o resultado da simulação poderá ser visualizado no *Google Maps™* e/ou *Google Earth™*. O *software Repast™* atende plenamente a esse quesito. Adicionalmente os dados gerados durante a simulação podem ser armazenados em um banco de dados *MySQL™* (ORACLE, 2011; APPLETON;STUCKER, 2007), e utilizados posteriormente na própria simulação ou para análise do processo e/ou fenômeno em estudo. Devido aos gráficos gerados, o uso do *Repast™* já resolve também as questões associadas à etapa 6 da metodologia.

O *software Repast™* tem a capacidade de organizar e exibir informações em uma interface gráfica na qual os agentes autônomos são posicionados arbitrariamente dentro de um ambiente espacial e sua distribuição aparece em um mapa georreferenciado, para ser visto e interpretado (MAGUIREIRE; BATTY; GOODCHILD, 2005) (Figura 20).

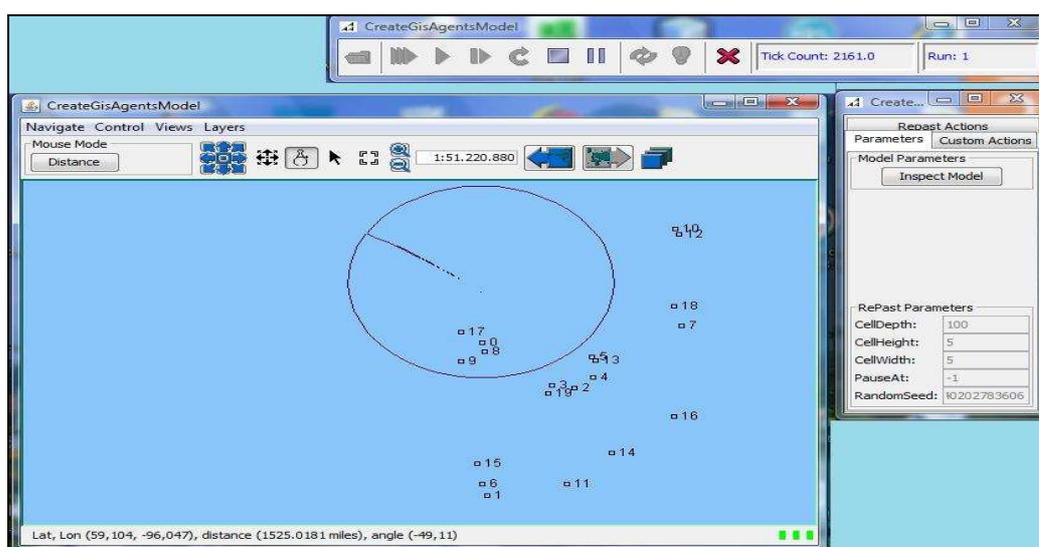


Figura 20 - Ferramenta de simulação baseado em SIG e agentes autônomos-Repast 3™

6.2 Exemplos de simulação de acidentes radiológicos e nucleares, estudos de caso e validação do modelo proposto

Os acidentes a serem simulados enquadram-se em duas categorias: i) radiológicos e ii) nucleares. Os acidentes radiológicos normalmente enquadram-se no nível 4 da Escala Internacional de Eventos Nucleares e Radiológicos (IAEA, 2008) e, a princípio, devido às suas características, podem ocorrer em qualquer lugar. De modo geral estes acidentes devem-se a: i) fontes radioativas potencialmente perigosas e não controladas (abandonadas, perdidas, roubadas ou encontradas); ii) uso inadequado de fontes potencialmente perigosas utilizadas nas áreas médica ou industrial (ex.: as usadas em radiografia industrial); iii) exposição e contaminação do público por fontes radioativas de origem desconhecida; iv) reentrada na atmosfera de satélites contendo material radioativo; v) superexposições graves; vi) atos terroristas; vii) transporte de fontes radioativas em que ocorre acidentes.

Devido ao número de fontes radioativas em uso na sociedade moderna (IAEA, 2005), apesar de todas as medidas de segurança sugeridas pela IAEA (IAEA, 1999 ; IAEA, 2006) - e aplicadas pelos países, há sempre a possibilidade da ocorrência de acidentes radiológicos. O Ambiente Virtual para a Simulação de Acidentes Radiológicos e Nucleares (AVSAR) proposto nessa tese poderia ser muito útil na simulação e na avaliação de acidentes reais, como será mostrado a seguir, com a apresentação da simulação de um acidente hipotético e da simulação de um acidente real.

6.2.1 Acidente radiológico hipotético – caso geral – tipo e intensidade de fonte radioativa a serem definidos

O AVSAR estará sediado em uma URL (página web inicial), acessível por um navegador Internet (*browse*). Nesta página inicial o usuário irá inserir a posição da fonte radioativa, definida pela latitude e longitude da mesma, segundo o sistema de referência WGS-1984. Caso a latitude e longitude da fonte estejam referenciadas relativamente a um outro sistema de referência deverão ser convertidas para o WGS-1984, a fim de se

obter um correto posicionamento da mesma. Em seguida deverá ser fornecido o tipo e atividade da fonte. A partir das equações (2),(3),(4) e (5) o AVSAR irá calcular a taxa de exposição, dose absorvida, dose efetiva, eventualmente considerando efeitos de blindagem. Como a dose efetiva (que é a grandeza que realmente interessa) depende do tempo de exposição, o AVSAR irá traçar círculos concêntricos em torno da fonte indicando as doses efetivas recebidas em um nível que possam afetar a saúde, indicando o tempo de exposição necessário para se atingir essas doses. Tanto os círculos como o tempo de exposição poderão ser alterados interativamente pelo usuário, resultando em valores de doses efetivas distintos. Usando-se as API's do *Google Maps*TM será possível: i) localizar hospitais, escolas e/ou outras instituições em um raio pré-determinado ao redor da fonte; ii) traçar polígonos ou círculos que estabeleçam uma zona de exclusão ao redor da fonte; iii) verificar rotas alternativas para o deslocamento de veículos e pessoas; iv) informar ao público sobre as consequências do acidente por faixas de distância da fonte.

Havendo informações sobre a distribuição de pessoas nas áreas próximas ao local da fonte, bem como o tempo a que estiveram expostas, será possível calcular o número de indivíduos afetados e a dose efetiva associada a cada um deles. Todavia, em muitos casos estas informações não estão disponíveis, principalmente o tempo de exposição. Nestas situações o uso de *software* para a modelagem de sistemas multi-agentes poderá ser útil para se criar, distribuir no espaço geográfico e registrar as doses efetivas associadas a cada agente. Os resultados poderiam ser mostrados de forma agregada em tabelas ou gráficos, como permite o software *Repast*TM. Desta forma, poderia ser estimado o número de indivíduos afetados e o impacto que isto iria causar no sistema de saúde, alertando-se o pessoal de emergência radiológica e do sistema de saúde para as medidas a serem tomadas.

A Figura 21 mostra uso do AVSAR neste primeiro exemplo de simulação (ver Apêndices A até J com as demais funcionalidades do AVSAR).



Figura 21 - Ambiente virtual (AVSAR) – efeitos da radiação nas zonas de exclusão – localidade estádio do Maracanã.

6.2.2 - Acidente radiológico real – Cochabamba, Bolívia, 2002

Uma fonte de Ir^{192} (meia-vida de 74,5 dias) foi transportada em um container dentro de um ônibus de passageiros e, acidentalmente, ficou exposta sem que os técnicos descobrissem a tempo. Este ônibus estava com sua lotação máxima (55 passageiros) e realizou um trajeto, com 8 horas de duração, de Cochabamba até a cidade de La Paz. Este acidente radiológico ocorrido na Bolívia, em 2002, foi reconstruído pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2004) e possibilitou a estimacão das doses recebidas pelas pessoas que estavam nas proximidades da fonte exposta. O efeito da radiação somente foi relevante para as pessoas situadas a poucos metros da fonte, ou seja, para as pessoas dentro do ônibus.

Na aplicacão das fórmulas de Taxa de Exposicão (equaçã 2), de Dose Absorvida (equaçã 3) e de Dose Equivalente (equaçã 4) levou-se em conta a posicão relativa dos passageiros e o tempo desta exposicão. Foram consideradas, portanto, como variáveis relevantes para a determinacão das doses: i) a distância entre o

passageiro e a fonte radioativa, que permaneceu fixa durante toda a viagem, ii) o tempo de exposição.

O Instituto Boliviano de Tecnologia e Energia Nuclear (IBTEN) estimou a dose recebida pelos passageiros, através de aplicação de cálculo matemático, assumindo a altura dos assentos dos passageiros e sua posição relativa às três alturas possíveis aonde teria sido acondicionada a fonte radioativa no compartimento de carga do ônibus.

Através da utilização do *Repast 3TM* (Figura 22), construiu-se os agentes autônomos, através de programa computacional, permitindo o cálculo das doses (equação 2). Na análise comparativa entre a simulação e as doses estimadas pelo IBTEN encontrou-se uma diferença média de 4 % (Tabela 2). Esta diferença ocorreu, tendo em vista que na simulação não se levou em conta os efeitos de blindagem. Esta reduzida diferença permite verificar que as doses máximas se concentraram nos passageiros que estavam sentados nos assentos 27-30 (doses de 2,77 Gy e 3,14 Gy) e 31-34 (doses de 2,29 Gy e 2,0792 Gy) e que as doses mínimas encontradas, também, nas duas estimativas, ocorreram nos assentos 1-4 (doses de 0,02 Gy e 0,0196 Gy) (DE ALMEIDA SILVA, 2007).

Através desses dados, percebe-se que a simulação usando *Repast 3TM* consegue detectar as posições de contaminação máxima e mínima ocorrida dentro do ônibus de passageiros, bem como o valor das doses a que foram expostos.

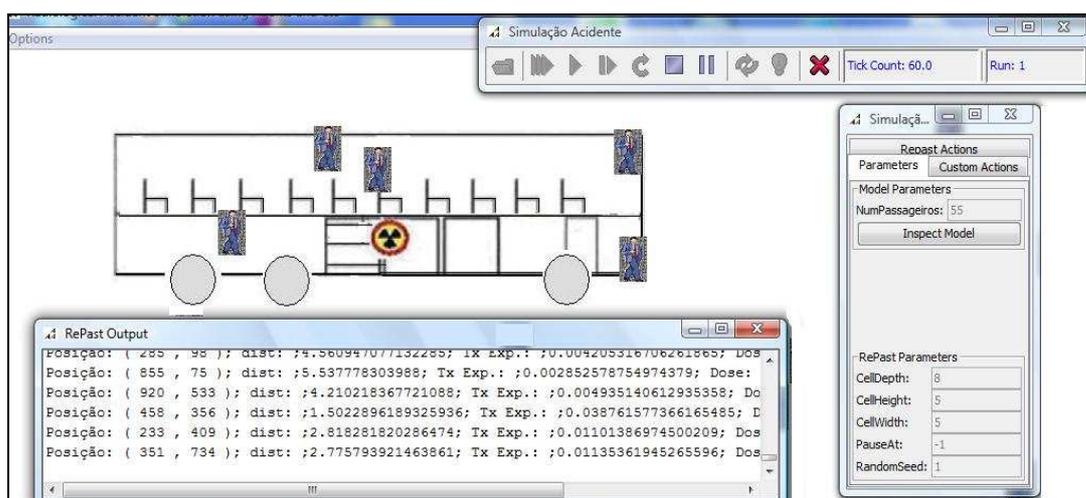


Figura 22 – Acidente radiológico de Cochabamba - simulação com Repast3TM

Tabela 2 - Comparação das doses estimadas com a simulação do Repast3TM
 Fonte: DE ALMEIDA SILVA, 2007

Assento do Ônibus	Distância (m)	Distância (m)	Dose (Gy)	Dose (Gy)
	(IBTEN)	(SIMULAÇÃO)	(IBTEN)	(SIMULAÇÃO)
1-4	5,915	5,9709	0,02	0,0196
5-6	4,830	4,8021	0,03	0,0303
7-10	4,183	3,9509	0,04	0,0448
11-14	3,162	3,3273	0,07	0,0632
15-18	2,236	2,0148	0,14	0,1724
19-22	1,357	1,3111	0,38	0,4071
23-26	0,653	0,6584	1,64	1,6145
27-30	0,503	0,4721	2,77	3,1401
31-34	0,553	0,5802	2,29	2,0792
35-38	1,160	1,1544	0,52	0,5251
39-42	2,029	2,0148	0,17	0,1724
43-46	2,789	2,7990	0,09	0,0893
47-50	3,741	3,7485	0,05	0,0498
51-55	4,830	4,8021	0,03	0,0303

Com base nas informações iniciais colhidas, o IBTEN produziu um relatório que forneceu uma estimativa da dose para o trabalhador que transportou o equipamento de radiografia industrial, com a fonte exposta, para o ônibus (trabalhador 1): 0,72 Gy. Isto foi baseado em uma exposição de 8 horas a uma distância de 1 m. Também, este órgão fez avaliações das doses, possivelmente, recebidas pelos passageiros do ônibus. A avaliação indicou a possibilidade de doses de até cerca de 2,5 Gy (IAEA, 2004).

Logo após esta análise preliminar, o IBTEN entrou em contato com a Autoridade de Regulamentação Nuclear da Argentina (ARN) e solicitou testes de aberrações cromossômicas nos trabalhadores que transportaram e manipularam o equipamento cuja fonte não estava blindada e tiveram, portanto, contato direto com a fonte. Os resultados ficaram disponíveis 1 mês após o acidente (IAEA, 2004).

Paralelo a estes procedimentos, o IBTEN empreendeu uma campanha na mídia dirigida ao público em geral que forneceu pormenores do acidente e pediu que, aqueles que pudessem estar entre os passageiros do ônibus, se apresentassem para exames. Infelizmente nenhum passageiro se apresentou (IAEA, 2004).

Portanto, somente amostras de sangue dos trabalhadores, que transportaram o equipamento de radiografia industrial, puderam ser enviadas para a ARN. As amostras

foram processadas de acordo com os protocolos descritos no manual da AIEA sobre dosimetria citogenética (IAEA, 2001).

Os resultados desta análise são mostrados na Tabela 4. As doses foram estimadas em média de 160 mGy, e incluída uma pequena correção a mais para permitir o atraso de cerca de três meses entre a irradiação e análise das amostras de sangue (IAEA, 2004).

Tabela 3 - Resultado da dosimetria citogenética feita pela ARN

Fonte: IAEA, 2004

Trabalhador	Celúlas Contabilizadas	Dose Estimada (mGy)
1	510	190
2	503	160
3	500	< 100
4	612	130

Ao comparar as doses da Tabela 3, resultado da dosimetria citogenética, com a simulação utilizando o *Repast3TM*, cujo resultado encontra-se na Tabela 2, percebe-se que os valores da simulação, para as distâncias inferiores a 1m, são maiores que os resultados obtidos com a dosimetria citogenética. Isto se deve ao tempo que foi considerado na simulação do *Repast3TM* (DE ALMEIDA SILVA, 2007), de 8 horas (tempo da viagem do ônibus), diferente do tempo em que ficaram expostos os trabalhadores (inferior a 30 minutos) (IAEA, 2004) e, sobretudo, do maior grau de precisão da estimativa da dose que a análise citogenética produz (Tabela 4).

Tabela 4 - Comparação das doses estimadas pela simulação e pela dosimetria citogenética

Distância (m)	Dose (Gy)	Distância (m)	Dose (mGy)
SIMULAÇÃO	SIMULAÇÃO	-	CITOGÉNÉTICA
0,6584	1,6145	-	160
0,4721	3,1401	-	190
0,5802	2,0792	-	130

A participação de centenas de pessoas, sejam socorristas, militares e voluntários, se passando por vítimas, é necessária para a execução de exercícios que permitam testar a capacidade de resposta e agilidade no atendimento da polícia, bombeiros e serviço de ambulância em uma situação hipotética de emergência.

Diversos artefatos podem ser usados em um ataque, dentre eles está o uso de material radioativo implantado maliciosamente no trem ou na estação ou o uso de uma bomba-suja (explosivo+material radioativo). No caso de uma fonte radioativa implantada, o principal desafio é simular a quantidade de usuários irradiados, o tempo mínimo e máximo de exposição à fonte e o cálculo da dose recebida pelo público antes da descoberta da fonte radioativa. Esta simulação poderá prever as áreas vulneráveis, número de pessoal técnico de monitoramento e descontaminação envolvidos, bem como quantidade de equipe de socorro necessária para fazer frente a este evento e tecnologias necessárias para tornar ágil a descontaminação e comunicação rápida entre as equipes médicas, do corpo de bombeiro e da polícia.

Para modelar este cenário, usou-se a *teoria das distribuições discretas* (Spieer; Stephens, 2009) a fim de determinar a probabilidade do número de pessoas irradiadas em uma estação de trem (estação da Carioca), em caso de colocação de uma fonte radioativa na plataforma dessa estação. Usou-se para esta modelagem a distribuição de *Poisson* (SPIEER; STEPHENS, 2009).

Os conceitos da estatística, portanto, podem ser aplicados na resolução de problemas que envolvam acidentes radiológicos, principalmente, no que se relaciona a distribuição de pessoas em determinada área geográfica. Os problemas, encontrados em um determinado processo, apresentam as mesmas características, o que permite estabelecer um modelo teórico para determinar a sua solução.

Os componentes principais de um modelo estatístico teórico:

1. Os possíveis valores que a variável aleatória X pode assumir;
2. A função de probabilidade associada à variável aleatória X ;
3. O valor esperado da variável aleatória X ;
4. A variância e o desvio-padrão da variável aleatória X .

Há dois tipos de distribuições teóricas que correspondem a diferentes tipos de dados ou variáveis aleatórias: a distribuição discreta e a distribuição contínua (SPIEER; STEPHENS, 2009).

A teoria das distribuições discretas descrevem quantidades aleatórias (dados de interesse) que podem assumir valores particulares e os valores são finitos. Por exemplo,

uma variável aleatória discreta pode assumir somente os valores 0 e 1, ou qualquer inteiro não negativo etc. Um exemplo de variável climatológica discreta são as tempestades com granizo (SPIEER; STEPHENS, 2009).

Enquanto a distribuição *Binomial* (SPIEER; STEPHENS, 2009) pode ser usada para encontrar a probabilidade de um número designado de sucessos em n tentativas, a distribuição de *Poisson* é usada para encontrar a probabilidade de um número designado de sucessos por unidade de intervalo. Na *Binomial* todo fenômeno elegível é estudado, enquanto na distribuição de *Poisson* somente os casos com um resultado particular são estudados. Por exemplo: na *Binomial* todos os carros são estudados para ver se eles tiveram um acidente ou não, enquanto ao se usar a distribuição de *Poisson* somente os carros que tiveram um acidente são estudados.

As outras condições exigidas para se aplicar a distribuição *Binomial* são também exigidas para se aplicar a distribuição de *Poisson*; isto é, devem existir somente dois resultados mutuamente exclusivos, os eventos devem ser independentes, e o número médio de sucessos por unidade de intervalo deve permanecer constante (SPIEER; STEPHENS, 2009).

A distribuição de *Poisson* é frequentemente usada em pesquisa operacional na solução de problemas administrativos. Alguns exemplos são o número de chamadas telefônicas para a polícia por hora, o número de clientes chegando a uma bomba de gasolina por hora, e o número de acidentes de tráfego num cruzamento por semana.

Para a distribuição de *Poisson*, a probabilidade de um número designado de sucessos por unidade de intervalo, $P(X)$, é dada por (SPIEER; STEPHENS, 2009):

$$P(X) = \frac{\lambda^X e^{-\lambda}}{X!} \quad (21)$$

Onde,

X: número designado de sucessos

λ : o número médio de sucessos num intervalo específico

e: A base do logaritmo natural, ou 2,71828

Dado o valor de λ , podemos encontrar $e^{-\lambda}$, substituindo na fórmula, e encontrar $P(X)$. Note que λ é a média e a variância da distribuição de *Poisson*.

Podemos usar a distribuição de *Poisson* como uma aproximação da distribuição *Binomial* quando n, o número de tentativas, for grande e p (probabilidade) ou $1 - p$ for pequeno (eventos raros). Um bom princípio básico é usar a distribuição de *Poisson* quando $n \geq 30$ e $n.p$ ou $n.(1-p) < 5$. Quando n for grande, pode-se consumir muito

tempo ao usar a distribuição binomial e tabelas para probabilidades binomiais, para valores muito pequenos de p , podem não estarem disponíveis. Se $n(1-p) < 5$, sucesso e fracasso deverão ser redefinidos de modo que $np < 5$ para tornar a aproximação precisa (SPIEER; STEPHENS, 2009).

Quando se aplicou a distribuição de *Poisson* (Equação 8) para determinar a probabilidade de pessoas irradiadas na estação do Metrô da Carioca, levou-se em conta os seguintes parâmetros:

- i. A média de passageiros na estação: 115 mil/ dia (Figura 24);
- ii. O horário de funcionamento do Metrô: 05h00 às 00h00 (METRÔ RIO, 2012);
- iii. O intervalo entre os trens: 11 minutos (METRÔ RIO, 2012);
- iv. A quantidade de trens que param na estação: 103 trens/dia;
- v. A quantidade média de pessoas que embarcam na estação em uma direção: 558 pessoas;

Aplicando-se a equação 8, para um média de 558 pessoas ou menos a serem irradiadas durante 19 horas de funcionamento da estação encontra-se o valor 61 % , indicando que existe uma forte tendência, em um dia de funcionamento da estação, de que um número expressivo de pessoas tenha sido irradiada (Tabela 5)

DESLOCAMENTO MÉDIO - JULHO/2009			
Linha 1		Linha 2	
IPANEMA/GAL OSÓRIO	51.816	CIDADE NOVA	14.507
CANTAGALO	20.270	SÃO CRISTOVÃO	26.436
SIQUEIRA CAMPOS	47.737	MARACANÃ	15.256
ARCOVERDE	25.194	TRIAGEM	10.755
BOTAFOGO	133.897	MARIA DA GRAÇA	16.561
FLAMENGO	35.791	DEL CASTILHO	33.263
LARGO DO MACHADO	49.365	INHAÚMA	12.141
CATETE	23.397	ENG. DA RAINHA	10.252
GLÓRIA	20.540	TOMAS COELHO	5.150
CINELÂNDIA	72.088	VICENTE DE CARVALHO	29.796
CARIOCA	115.462	IRAJÁ	23.255
URUGUAIANA	77.462	COLÉGIO	13.381
PRESIDENTE VARGAS	17.603	COELHO NETO	20.772
CENTRAL	168.486	F. BOTAFOGO / ACARI	7.873
PRAÇA ONZE	10.425	ENG. RUBENS PAIVA	10.425
ESTÁCIO	18.587	PAVUNA	85.713
AFONSO PENA	21.967		
URUGUAIANA	77.462	COLÉGIO	13.381
PRESIDENTE VARGAS	17.603	COELHO NETO	20.772
CENTRAL	168.486	F. BOTAFOGO / ACARI	7.873
PRAÇA ONZE	10.425	ENG. RUBENS PAIVA	10.425
ESTÁCIO	18.587	PAVUNA	85.713
AFONSO PENA	21.967		
S. F. XAVIER	22.104	SUBTOTAL	335.535
SAENS PENA	94.871		
SUBTOTAL	1.027.060		

Figura 24 - Deslocamento médio nas estações do metrô do Rio de Janeiro
 Fonte: METRÔ RIO, 2012

Tabela 5 - Aplicação da distribuição de Poisson ao número de passageiros presentes na estação do metrô da Carioca.

X	P(X)	Minutos	Horas	X	P(X)	Minutos	Horas	X	P(X)	Minutos	Horas	X	P(X)	Minutos	Horas
p(467)	0,000007	1144	19,1	p(500)	0,000784	781	13,0	P(532)	0,00891	418	7,0	P(555)	0,016705	55	0,9
p(468)	0,000008	1133	18,9	p(501)	0,000873	770	12,8	P(533)	0,009346	407	6,8	P(556)	0,016795	44	0,7
p(469)	0,00001	1122	18,7	p(502)	0,00097	759	12,7	P(534)	0,009784	396	6,6	P(557)	0,016855	33	0,6
p(470)	0,000011	1111	18,5	p(503)	0,001076	748	12,5	P(535)	0,010224	385	6,4	P(558)	0,016886	22	0,4
p(471)	0,000014	1100	18,3	p(504)	0,001192	737	12,3	P(536)	0,010663	374	6,2				
p(472)	0,000016	1089	18,2	P(504)	0,001192	726	12,1	P(537)	0,011101	363	6,1				
p(473)	0,000019	1078	18,0	P(505)	0,001317	715	11,9	P(538)	0,011535	352	5,9				
p(474)	0,000023	1067	17,8	P(506)	0,001452	704	11,7	P(539)	0,011964	341	5,7				
p(475)	0,000027	1056	17,6	P(507)	0,001598	693	11,6	P(540)	0,012386	330	5,5				
p(476)	0,000032	1045	17,4	P(508)	0,001756	682	11,4	P(531)	0,012799	319	5,3				
p(477)	0,000037	1034	17,2	P(509)	0,001925	671	11,2	P(532)	0,00891	308	5,1				
p(478)	0,000043	1023	17,1	P(510)	0,002106	660	11,0	P(533)	0,009346	297	5,0				
p(479)	0,000051	1012	16,9	P(511)	0,0023	649	10,8	P(534)	0,009784	286	4,8				
p(480)	0,000059	1001	16,7	P(512)	0,002506	638	10,6	P(535)	0,010224	275	4,6				
p(481)	0,000068	990	16,5	P(513)	0,002726	627	10,5	P(536)	0,010663	264	4,4				
p(482)	0,000079	979	16,3	P(514)	0,002726	616	10,3	P(537)	0,011101	253	4,2				
p(483)	0,000092	968	16,1	P(515)	0,00296	605	10,1	P(538)	0,011535	242	4,0				
p(484)	0,000106	957	16,0	P(516)	0,003207	594	9,9	P(539)	0,011964	231	3,9				
p(485)	0,000122	946	15,8	P(517)	0,003468	583	9,7	P(540)	0,012386	220	3,7				
p(486)	0,00014	935	15,6	P(518)	0,003743	572	9,5	P(541)	0,012799	209	3,5				
p(487)	0,00016	924	15,4	P(519)	0,004032	561	9,4	P(542)	0,013201	198	3,3				
p(488)	0,000183	913	15,2	P(520)	0,004335	550	9,2	P(543)	0,013591	187	3,1				
p(489)	0,000209	902	15,0	P(521)	0,004652	539	9,0	P(544)	0,013966	176	2,9				
p(490)	0,000238	891	14,9	P(522)	0,004982	528	8,8	P(545)	0,014325	165	2,8				
p(491)	0,000271	880	14,7	P(523)	0,005326	517	8,6	P(546)	0,014667	154	2,6				
p(492)	0,000308	869	14,5	P(524)	0,005683	506	8,4	P(547)	0,01499	143	2,4				
p(493)	0,000348	858	14,3	P(525)	0,006051	495	8,3	P(548)	0,015291	132	2,2				
p(494)	0,000393	847	14,1	P(526)	0,006432	484	8,1	P(549)	0,01557	121	2,0				
p(495)	0,000443	836	13,9	P(527)	0,006823	473	7,9	P(550)	0,015825	110	1,8				
p(496)	0,000499	825	13,8	P(528)	0,007224	462	7,7	P(551)	0,016055	99	1,7				
p(497)	0,00056	814	13,6	P(529)	0,007635	451	7,5	P(552)	0,016259	88	1,5				
p(498)	0,000628	803	13,4	P(530)	0,008054	440	7,3	P(553)	0,016436	77	1,3				
p(499)	0,000702	792	13,2	P(531)	0,008479	429	7,2	P(554)	0,016585	66	1,1				
	0,005906				0,119585				0,414185				0,067241		
$P(x \leq 558) = 61\% \text{ de probabilidade}$															

Para o cálculo da dose absorvida utiliza-se a *Equação 3*, em que se leva em consideração o tempo de exposição (para a simulação utiliza-se 11 min referente ao intervalo entre os trens) e a atividade da fonte radioativa identificada. Para uma representação georeferenciada, utiliza-se um arquivo *KML* com informações sobre a localização geográfica da estação e o “balão” de informações sobre a probabilidade de pessoas expostas naquela localização (Figura 25).

Para a determinação da quantidade de pessoas, possivelmente, afetadas pela radiação na estação realizou-se uma distribuição média dos passageiros na plataforma. Arbitrou-se uma quantidade de 01 passageiro a cada metro, o que levaria a se ter 120 passageiros distribuídos ao longo da plataforma esperando o próximo trem (o tamanho da plataforma é de 120 metros). Observando os dados de dose efetiva por metro, que consta na Figura 26, pode-se perceber que um total de 8 indivíduos receberiam uma dose que poderia comprometer sua saúde (dose efetiva entre $7,71e+2\text{mSv}$ para a distância de 0,1 m e $9,64e+0\text{mSv}$ para a distância de 8 m) a cada intervalo de 11 minutos, pois ultrapassam os limites anuais de dose para trabalhadores e para o público (Tauhata, 2002). Por sua vez, ao analisar-se o período de funcionamento completo da

estação de 19 horas, tem-se um total médio de 829 pessoas, possivelmente, irradiadas e com doses efetivas que poderiam ter sua saúde comprometida.

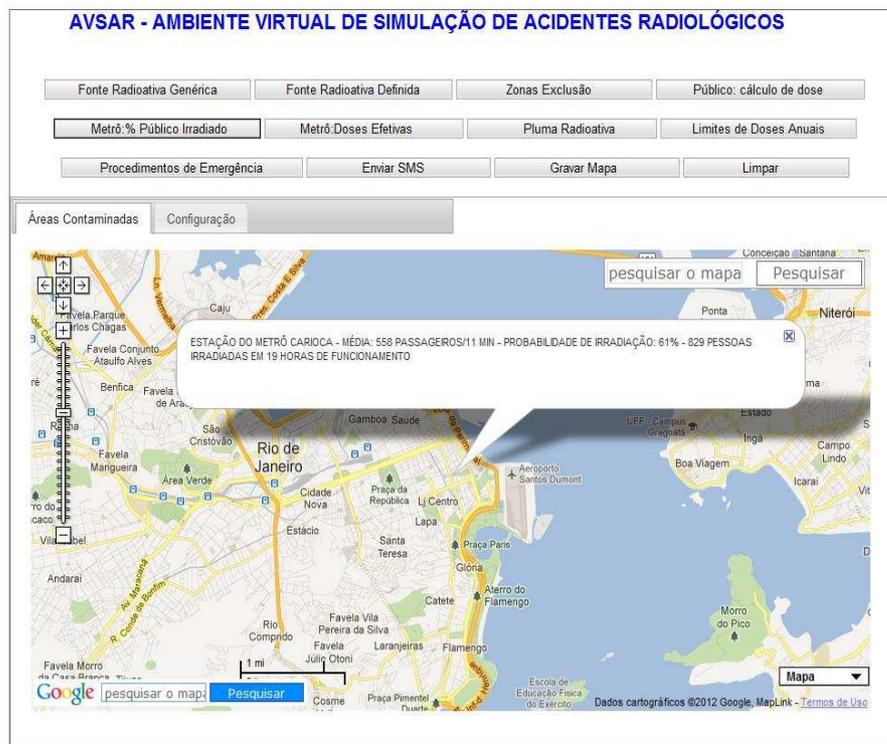


Figura 25 - Estação do metrô da Carioca no ambiente virtual

Cs-137		Limites Anuais				
Atividade	2.20e+12 TBq	Grandeza		Trabalhador Exposto	Indivíduo do Público	
Tempo Exposição (h)	0,18	Dose Efetiva	-	20 mSv	10 mSv	
Distância(m)		0,1 m	0,2 m	0,3 m	0,4 m	0,5 m
Taxa de Dose:		6.57e+3 mGy/h	3.28e+3 mGy/h	2.19e+3 mGy/h	1.64e+3 mGy/h	1.31e+3 mGy/h
Dose Efetiva:		7.71e+2 mSv	3.86e+2 mSv	2.57e+2 mSv	1.93e+2 mSv	1.54e+2 mSv
Distância(m)		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
Taxa de Dose:		6.57e+2 mGy/h	3.28e+2 mGy/h	2.19e+2 mGy/h	1.64e+2 mGy/h	1.31e+2 mGy/h
Dose Efetiva:		7.71e+1 mSv	3.86e+1 mSv	2.57e+1 mSv	1.93e+1 mSv	1.54e+1 mSv
Distância(m)		6 m	7 m	8 m	9 m	10 m
Taxa de Dose:		1.09e+2 mGy/h	9.38e+1 mGy/h	8.21e+1 mGy/h	7.30e+1 mGy/h	6.57e+1 mGy/h
Dose Efetiva:		1.29e+1 mSv	1.10e+1 mSv	9.64e+0 mSv	8.57e+0 mSv	7.71e+0 mSv
Distância(m)		11 m	12 m	13 m	14 m	15 m
Taxa de Dose:		5.97e+1 mGy/h	5.47e+1 mGy/h	5.05e+1 mGy/h	4.69e+1 mGy/h	4.38e+1 mGy/h
Dose Efetiva:		7.01e+0 mSv	6.43e+0 mSv	5.93e+0 mSv	5.51e+0 mSv	5.14e+0 mSv
Distância(m)		20 m	30 m	40 m	50 m	60 m
Taxa de Dose:		3.28e+1 mGy/h	2.19e+1 mGy/h	1.64e+1 mGy/h	1.31e+1 mGy/h	1.09e+1 mGy/h
Dose Efetiva:		3.86e+0 mSv	2.57e+0 mSv	1.93e+0 mSv	1.54e+0 mSv	1.29e+0 mSv
Distância(m)		70 m	80 m	90 m	100 m	110 m
Taxa de Dose:		9.38e+0 mGy/h	8.21e+0 mGy/h	7.30e+0 mGy/h	6.57e+0 mGy/h	5.97e+0 mGy/h
Dose Efetiva:		1.10e+0 mSv	9.64e-1 mSv	8.57e-1 mSv	7.71e-1 mSv	7.01e-1 mSv
Distância(m)		120 m				
Taxa de Dose:		5.47e+0 mGy/h				
Dose Efetiva:		6.43e-1 mSv				

Figura 26 - Cálculo da dose na estação do metrô da Carioca

Para as demais estações podemos adotar as mesmas técnicas, tendo-se em conta o deslocamento médio de passageiros presentes na estação do metrô. Com isto cria-se um mapa temático com uma importante análise de quantidade de pessoas irradiadas em caso de um acidente radiológico nas estações e das doses recebidas.

Esta simulação não substitui a que poderia ser feita em macro escala em que uma estação de verdade, pessoas e equipes de socorro devesse participar para treinamento mais próximo da realidade. A simulação proposta serve de base para estudo preliminar do incidente e, também, para replicar em outras localizações geográficas (estações) a um custo muito menor o incidente. Este tipo de abordagem reforça o treinamento das equipes envolvidas.

6.2.4. Simulação de pluma radioativa na usina nuclear de Angra dos Reis, Rio de Janeiro

Quando ocorre um acidente nuclear ou radiológico, apesar da possibilidade da fonte radioativa ser controlada em curto espaço de tempo, os materiais radioativos poderão ser dispersos na atmosfera. É importante a simulação da dispersão da pluma com a determinação das concentrações no espaço geográfico a fim de se determinar o volume de inalação de particulado radioativo presente no ar.

Pode-se determinar uma região geográfica visualizada no Google EarthTM, dividindo-a em células retangulares e as doses efetivas decorrentes da inalação dos radionuclídeos presentes na pluma poderiam ser estimadas para o centro de cada uma dessas células e comparadas com valores padrões, sendo as células coloridas de acordo com o grau de risco apresentado, o que forneceria uma razoável visualização dos efeitos da pluma. Para tanto poder-se-ia usar um dos modelos disponíveis para dispersão da pluma radioativa, e.g. o modelo encontrado em Ribeiro (RIBEIRO; COELHO, 2008). No entanto, a equação da dispersão da pluma é desenvolvida relativamente a um referencial topocêntrico (X' , Y' , Z') cuja origem se encontra na chaminé de onde emana a pluma, sendo que o eixo Z' coincide com a chaminé e é direcionado para fora da Terra, o eixo X' é paralelo à direção do vento e o eixo Y' faz um ângulo de 90^0 com o eixo X' , computado no sentido contrário aos ponteiros de um relógio. Do Google EarthTM consegue-se extrair as coordenadas geodésicas (λ , ϕ , h) relativas ao referencial

WGS84. Todavia, para a correta utilização da equação da dispersão da pluma precisa-se efetuar uma transformação de coordenadas do referencial WGS84 para o referencial topocêntrico (X' , Y' , Z'). Para tanto, usou-se o software Geotranz (NGA, 2012), seguindo-se todas as etapas e implicitamente usando-se as equações delineadas no ítem 5.4.2. Recapitulando as etapas são: i) conversão das coordenadas do WGS-84 (λ , ϕ , h), i. e., aquelas lidas no Google EarthTM para o referencial cartesiano ECEF (X , Y , Z) com origem no centro de massa da Terra, eixo Z coincidindo com o eixo da Terra e apontando na direção do pólo norte, eixo X passando pelo Equador no meridiano primário e eixo Y passando pelo equador a 900 graus de longitude; ii) conversão das coordenadas do referencial ECEF (X , Y , Z) para o referencial de coordenadas cartesianas local ENU (Leste, Norte, Elevado), cujo plano formado pelos eixos (Leste, Norte) ou (U , V) é o plano local geodésico ou plano tangente local, no caso a chaminé. O eixo Elevado coincide com a chaminé e é idêntico a Z' ; iii) Efetuar a conversão das coordenadas no referencial de coordenadas cartesianas local ENU (Leste, Norte, Elevado) para o referencial cartesiano local (X' , Y' , Z'), onde os eixos X' , Y' sofrem uma rotação de ρ graus, mensurada no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, relativamente aos eixos Leste, Norte. Agora, os valores das novas coordenadas encontradas estão no referencial da pluma e podem ser substituídos na equação (6) de dispersão da pluma radioativa.

O software Geotranz (NGA, 2012) possibilita uma conversão direta das coordenadas expressas no referencial WGS84 para as coordenadas relativas ao referencial topocêntrico (X' , Y' , Z'), em que o eixo X' é paralelo à direção do vento e o eixo Z' coincide com a chaminé de onde emana a pluma radioativa. A figura 27 mostra a interface do software Geotranz.

Deve-se destacar apenas o campo Orientation, que indica um ângulo de rotação (idêntico em formato, ao campo longitude) que especifica o ângulo (na direção dos ponteiros do relógio) entre o Norte e o eixo de coordenadas Y' -positivo do sistema de coordenadas local. Por default, X' aponta para Leste e Y' para o Norte, formando um plano tangente ao elipsóide de referência. Z' é perpendicular a este plano e coincide com a chaminé de onde emana a pluma.

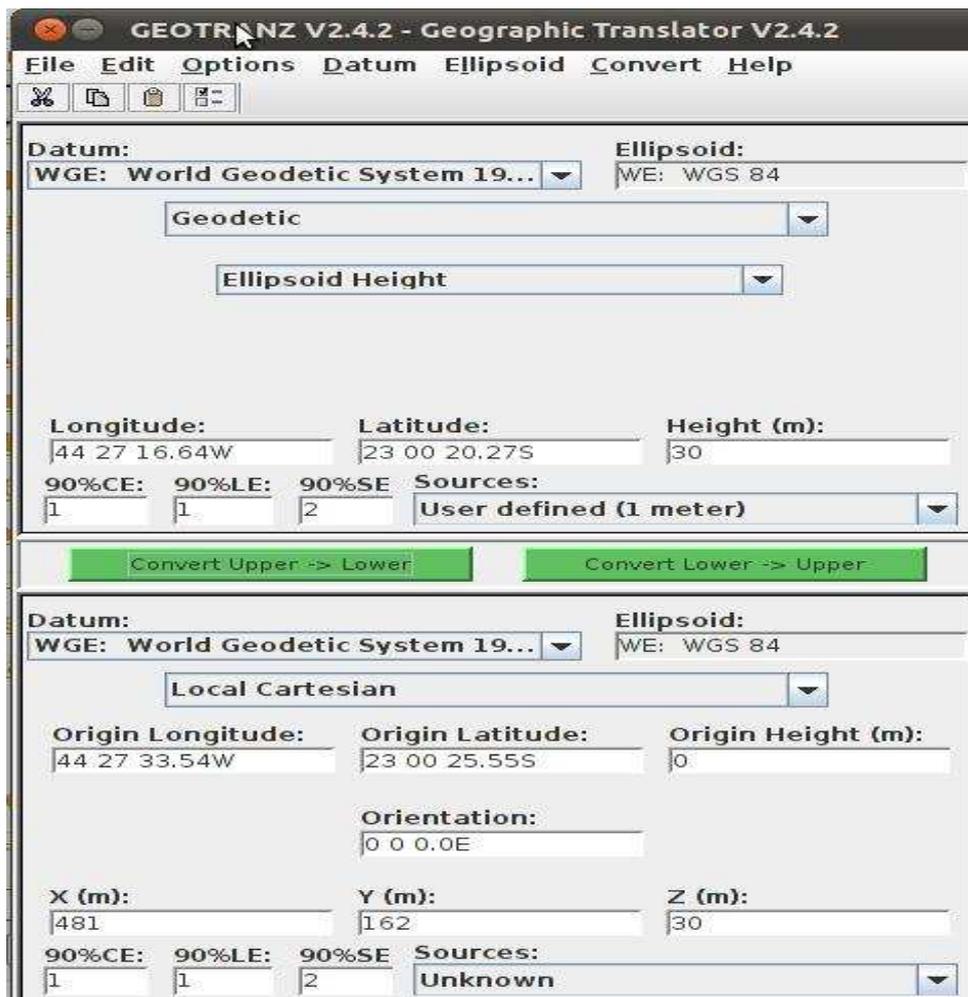


Figura 27 – Software Geotranz
 Fonte: NGA, 2012

Uma vez determinadas as coordenadas geográficas da pluma, pode-se calcular as concentrações de radioatividade nesses pontos geográficos. Para tanto, nessa terceira etapa, utilizou-se o *software* “Sistema de Avaliação Radiológica” (CONTI,2010).

Foram informados os seguintes dados de *input* (Figura 28):

- Tipo de radionucídeo;
- Volume de liberação (Bq/s);
- Velocidade do vento (m/s) ;
- Distância da instalação (Km);
- Classe de Estabilidade ;

DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Radionuclídeo: Cs-137

Liberação [Bq/s]: 10

Vel. Vento [m/s]: 4

Distância [km]: 1

Classe Estabilidade: E

Resultados

Conc. no Ar: 8.50e-4 Bq/m³

Figura 28 - Sistema de avaliação radiológica
Fonte: CONTI, 2010

Utilizou-se, nessa etapa, a concentração do Cs-137 em uma dispersão da pluma, hipoteticamente ocorrida, na Usina Nuclear de Angra dos Reis, cujos resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Concentrações no ar do Cs-137

	Cs-137				
	Liberação (Bq/s)	Velocidade do vento (m/s)	Distância (Km)	Classe de Estabilidade	Concentração (Bq/m ³)
1	5	10	<0,5	D	3,95E-04
2	5	10	1	D	1,20E-04
3	5	10	2	D	2,10E-05
4	5	10	3	D	1,15E-05
5	5	10	4	D	8,00E-06
6	5	10	5	D	5,50E-06
7	5	10	10	D	2,00E-06
8	5	10	20	D	7,00E-07

Como quarta e última etapa, as coordenadas geográficas e os valores da concentrações do radionuclídeo foram plotados no *Google Earth*TM permitindo uma visualização geoespacial de dispersão da pluma radioativa (Figura 29).

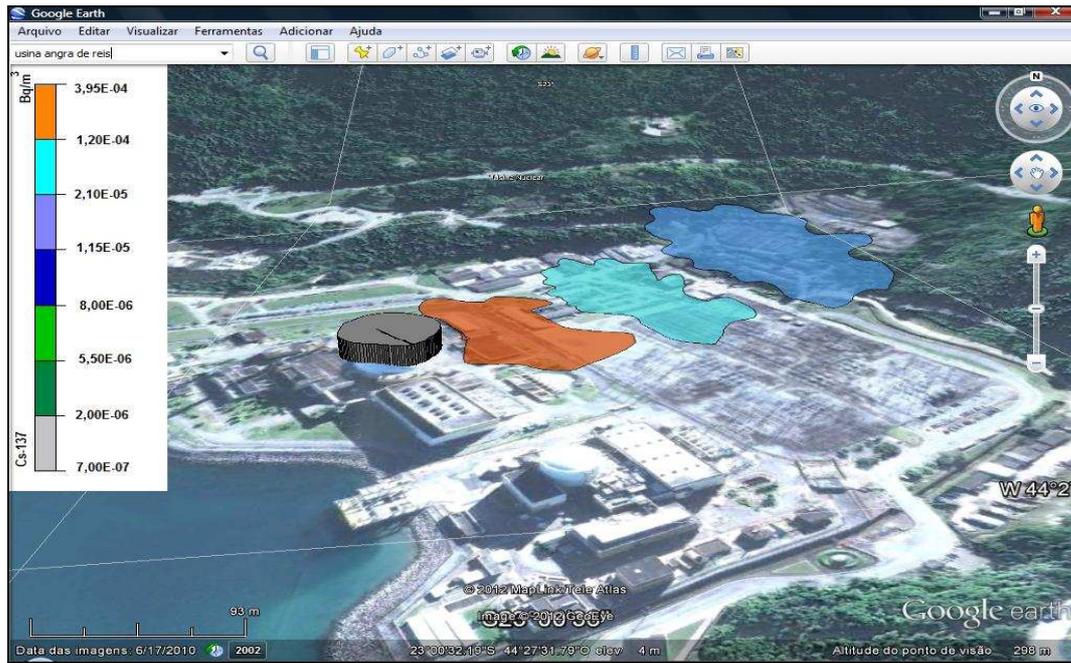


Figura 29 – Dispersão da pluma radioativa na usina nuclear de Angra dos Reis.

7 CONCLUSÕES, SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

O ambiente virtual apresentado nesta tese utiliza uma série de recursos de software – sistemas para modelagem de agentes (*Repast3TM*), sistema gerenciador de banco de dados *MysqlTM*, os serviços do *Google MapsTM*, *Google EarthTM* e a linguagens *JavaTM* e *JavaScriptTM* - integrando-os com a finalidade de simular acidentes radiológicos e nucleares. A representação do espaço geográfico oferecida pelo *Google MapsTM* ou *Google EarthTM* (eventualmente do *Repast3TM*) é usada para a visualização da simulação. Com o uso deste ambiente consegue-se: quantificar as doses recebidas pelas pessoas; ter uma eventual distribuição espacial das pessoas contaminadas; estimar o número de indivíduos contaminados; estimar o impacto na rede de saúde; estimar impactos ambientais; gerar zonas de exclusão; fornecer resposta pronta e rápida; construir cenários alternativos; treinar pessoal para lidar com acidentes radiológicos; reduzir custos na avaliação de acidentes radiológicos ou em sua simulação; fornecer informação à população através da disseminação da notícia sobre eventuais acidentes via Internet, necessitando, por parte do usuário, apenas de um *browse* (navegador Internet).

A utilização de saberes provenientes de diferentes ramos do conhecimento, com foco em questões ambientais e sociais relevantes, como é o caso da criação de ambientes virtuais para a simulação de acidentes radiológicos, permite identificar e modelar os problemas, analisando-os com base em princípios científicos. Esta abordagem permite investir em mudanças que minimizem os impactos dos acidentes radiológicos e a previsão de cenários mais amplos para abordagem e solução do problema proposto.

Pode-se destacar como recomendações e projetos futuros:

- Adaptar o ambiente virtual de simulação para executar em plataforma de tablet da *AppleTM* (*IpadTM*) e *smartphones* (*IphoneTM*);
- Construir uma rede de monitoramento ambiental para eventos de acidentes radiológicos, com mapeamento de áreas críticas (instalações industriais, escolas, hospitais, rios e comunidades carentes);
- Utilizar o ambiente virtual de simulação na Copa do Mundo do Brasil em 2014 e nos Jogos Olímpicos do Rio de Janeiro em 2016, como ferramenta de apoio à gestão de emergências radiológicas;

REFERÊNCIAS

AGAPOV A.M., ARUTYUNYAN R.V., KUDRIN A.Yu., ELISEEV A.M. *Experience of past radiation accidents and problems of response to possible dispersion of radioactive material in urban conditions*, International Conference on the safety and security of radioactive sources towards a global system for the continuous control of sources throughout their life cycle, Bordeaux, France, 27 June-July 2005.

AIRES, Kelson R.T. *Transformações Geométricas - Disciplina: Introdução à Computação Gráfica*. Piauí: Universidade Federal do Piauí, 2010. Disponível em: <http://www.die.ufpi.br/kelson/arquivos/cg/03.transformacoes.pdf> Acesso em: 05 ago. 2012.

APPLETON, Ben; STUCKER, Lary. *Using PHP/MySQL with Google Maps*. 2007. Disponível em: http://code.google.com/intl/en/apis/maps/articles/phpsqlajax_v3.html Acesso em: 03 de mar. 2012.

ARGONNE, National Laboratory. *Recursive Porus Agent Simulation Toolkit*. 2011. Disponível em: http://repast.sourceforge.net/repast_3/index.html. Acesso em: 02 de fev. 2012.

AZEVEDO, Paulo Cesar L. . *Portal de Estudos em Química*. 2010. Disponível em: <http://www.profpc.com.br/radioatividade.htm> , Acesso em: 01 de mai. 2012.

BANKS, Jerry. *Handbook of Simulation, Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice*. Atlanta, Georgia, USA. Emp Books, 1998.

BENENSON, Itzhak; Torrens Paul. *Geosimulation: Automata-Based Modeling of Urban Phenomena*. Chichester, West Sussex, England .John Wiley& Sons, Ltd. 2004.

BOESCH, D.F., *Managing Trouble Waters: The Role of Marine Environment Monitoring*, National Academies Press, Washington D.C., 1990.

BREDARIOL, Celso. *Conflito ambiental e negociação para uma política local de meio ambiente*. Tese de Doutorado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. UFRJ. 2001.

BRYNS, Leonardo Monteiro. *Cálculos Geodésicos - Aplicações On-Line*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Disponível em: <http://www6.ufrgs.br/engcart/Teste/inicial.html>, Acesso em: 20 de jun. 2012.

BURROUGH, P.A. *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, New York , USA. 1998.

CASTRO, Elza Maria Neffa Vieira de, BRANQUINHO, Fátima Teresa Braga. *Complexidade, Solidariedade e Participação no Projeto de Educação Ambiental do Programa de Despoluição da Baía de Guanabara*. 26ª Reunião Anual da ANPED. Poços de Caldas, MG. 2003.

CAPRA, Fritjof. *O Ponto de Mutação: A Ciência, a Sociedade e a Cultura Emergente*. 25. São Paulo, São Paulo. Editora Cultrix. 1982.

COPOLA, Gina. *A Lei dos Crimes Ambientais, Comentada Artigo por Artigo*. 2005. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/71922914/Lei-9605-98-Comentada> . Acesso em: 30 de abr. 2012.

DIAS, Bráulio F. S. et al. *Comissão Nacional de Biodiversidade: CONABIO 5 anos*. Brasília: MMA. CONABIO. 317 p. (Série Biodiversidade; 32). 2008.

CONTI, Luiz Fernando de Carvalho. *Desenvolvimento de um Sistema Integrado para Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental em Situações de Emergência*. Tese (Doutorado em Biologia) - Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

CONTI, Luiz Fernando de Carvalho. *Sistema de Avaliação Radiológica*. Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), 2010. [Sistema disponível na Intranet do Instituto].

CNEN. *Resolução nº 102, de 22 de dezembro de 2010*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 maio 2011. Disponível em: <http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=10/05/2011&jornal=1&pagina=7&totalArquivos=192>. Acesso em: 12 de mar. 2012.

CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. *Posição Regulatória 3.01/003:2011, Coeficiente de Dose para Indivíduos Ocupacionalmente Expostos*, Disponível em: http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_03.pdf . Acesso em: 12 de mar. 2012.

CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. *Posição Regulatória 3.01/011:2011, Coeficiente de Dose para Exposição do Público*, Disponível em: http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_11.pdf . Acesso em: 12 de mar. de 2012.

CROOKS, Andrew T. *The Repast Simulation/Modelling System for Geospatial Simulation*. Centre for Advanced Spatial Analysis University College London , London, England. 2007.

DA SILVA, F.C. A. ; HUNT J.G.; RAMALHO A. T; CRISPIM V.R.; *Dose Reconstruction of a Brazilian Industrial Gamma Radiography Partial-Body Overexposure Case*. Journal of Radiological Protection. Bristol, England. 2003.

DA SILVA, F. C. A. *O Comitê de Avaliação de Serviços de Ensaio e Calibração (CASEC)*. Workshop de Avanços da Radioproteção (IRD). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 2012.

DE ALMEIDA SILVA, Tadeu Augusto. *Simulação de Acidentes Radiológicos através de Software baseado em Agentes*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

DE ALMEIDA SILVA, Tadeu Augusto; FARIAS, O. L. M. *A Virtual Environment for Simulation of Radiological Accidents*. Conference on Nuclear Training and Education (CONTE). American Nuclear Society. Florida, USA. 2009.

DE SAMPAIO, P.A.B. *A finite element formulation for transient incompressible viscous flows stabilized by local-steps*, Computer Methods Applied Mechanics and Engineering. 2005. Disponível em: http://www.researchgate.net/publication/222537788_A_stabilized_finite_element_method_for_incompressible_viscous_flows_using_a_finite_increment_calculus_formulation. Acesso em: 12 de mar. de 2012.

DE SOUSA, Mara de C. ; *Transformação de Coordenadas: Translação , Rotação e Coordenadas Polares*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Matemática, 2007. Disponível em: <http://www.ime.uerj.br/professores/mara/> . Acesso em 05 de ago. de 2012.

DROGOUL, A.; FERBER, J. *Multi-agent Simulation as a Tool for Studying Emergent Processes in Societies*. The Computer Simulation of Social Phenomena. edited by N. Gilbert and J. Doran, 127-142. UCL Press. London, England. 1994.

ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. . *Fundamentals of Database Systems*. Addison-Wesley. Boston, USA. 2011.

FARIAS, O. L. M; SANTOS N. *Agent-Based Geographical Information System*. International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce - IAWTIC'2005, v. 1. p. 998-1005. , Edited by M. Mohammadian, Vienna. 2005.

FERNANDEZ, Efren P. J., *A Energia Nuclear no Direito Brasileiro*, 06 de julho 2010, Disponível em: <http://www.webartigos.com/artigos/a-energia-nuclear-no-direito-brasileiro/42088/> . Acesso em: 11 de mar. de 2012.

GARDNER, M. *Mathematical games: On cellular automata, self-reproduction, the Garden of Eden, and the game "life"*. Scientific American 224(2):112-117. USA. 1971.

GIMBLETT, H. Randy . *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes*. Oxford, University Press, USA. 2002.

GOLDEMBERG, José et Barbosa, L.M. *A Legislação Ambiental no Brasil e em São Paulo*. In: Revista Eco 21, Ano XIV, Edição 96. São Paulo, Brasil. 2004.

GOOGLE . *Google Maps Javascript API V3 Tutorial*. October 2011. Disponível em: <http://code.google.com/intl/en/apis/maps/documentation/javascript/tutorial.html#Intro> . Acesso em 11 dez. de 2011.

IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. *A Lei da Natureza*. 1998. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/leiambiental/home.htm> . Acesso em 30 de abr. de 2012.

IAEA, International Atomic Energy Agency. *The Radiological Accident in Goiânia*. Viena, Austria, 1988.

IAEA, International Atomic Energy Agency. *Radiation Safety*. Viena, Austria, 1996.

IAEA, International Atomic Energy Agency. *Generic Assessment Procedures for Determine Protective Actions During a Reactor Accident*. Viena, Austria. 1997.

IAEA, International Atomic Energy Agency. *Occupational Radiation Protection*, Safety Standards Series No. RS-G-1.1. Viena, Austria. 1999.

IAEA, International Atomic Energy Agency. *Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment*. Technical Reports Series No. 405. Vienna, Austria. 2001.

IAEA, International Atomic Energy Agency. *The Radiological Accident in Cochabamba*. Viena, Austria. 2004.

IAEA, International Atomic Energy Agency. *Categorization of Radioactive Sources, IAEA Safety Standards No. RS-G-1.9 Safety Guide*. Viena, Austria. 2005.

IAEA, International Atomic Energy Agency. *Fundamental Safety Principles, NO. SF-1, Safety Fundamentals*. Viena, Austria. 2006.

IAEA, International Atomic Energy Agency . *INES SCALE*. 2008. Disponível em: <http://www.IAEA.org/Publications/Factsheets/English/ines.pdf> . Acesso em 16 mar. de 2012.

IBGE, PROGRID: *Aplicativo desktop para conversão de coordenadas entre os sistemas de referência oficiais. Desenvolvido no âmbito do Projeto de Infra-estrutura Geoespacial Nacional (PIGN)*. 2009. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/download/geociencias.shtm> . Acesso em 08 de ago. de 2012.

JOHNSTON, Wm. Robert. *Database of Radiological Incidents and Related Events* 2011. Disponível em: <http://www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/index.html> . Acesso em 09 de maio de 2012.

KML, Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Keyhole_Markup_Language . Acesso em 30 de abril de 2012.

KOSE VALD. *Radiation*. 1997. Disponível em: <http://www.kose.ee/nucbasic/nucpedia/uk> . Acesso em 05 de mar. de 2012.

LEMOS, Marcela M.P.P.; AMARAL, Ademir J. *Análise Citogenética na Investigação de Incidentes Radiológicos*. Laboratório de Modelagem e Biodosimetria Aplicada, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife, Pernambuco. 2011.

LEVY, S. *Artificial Life. The Quest for a New Creation*. Penguin, China. 1992.

LIMA, F.R.A.; KRAMER R.; VIEIRA, J. W.; KHOURY, H. J.; LOUREIRO, E. C. M.; HOFF, G. *Cálculos de coeficientes de conversão para dose efetiva utilizando fantasmas de voxels adultos com gêneros definidos para exames comuns de radiodiagnóstico*. 2004. Disponível em: <http://www.abfm.org.br/c2004/trabalhos/weos73.pdf>. Acesso em 30 de abr. de 2012.

LIM, K. ; DEADMAN, P. J.; MORAN, E. ; BRONDÍZIO, E. ; MCCRACKEN, S. *Agent-based simulations of household decision making and land use change near Altamira, Brazil*. In Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling: Techniques for Simulating Social and Ecological Processes. ed. R. Gimblett. Oxford University Press . New York, USA. 2002.

LONGLEY, Paul A.; BATTY, Michael. *Advanced Spatial Analysis: The Casa Book of GIS*. ESRI Press. New York, USA. 2003.

MACHADO, Paulo Affonso Leme. *Direito Ambiental Brasileiro*. Malheiros Editores. 12^a ed. São Paulo, Brasil. 2004.

MAGRINI, Alessandra. *Gestão Ambiental*. Apostila de Curso. PPE/ COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2001.

MAGUIRE, David; BATTY, Michael; GOODCHILD, Michael. *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*. ESRI Press. New York, USA. 2005.

METRÔ RIO . 2012. Disponível em: <http://www.metrorio.com.br/> . Acesso em 12 de mai. de 2012.

MILARÉ, Édis. *Direito do Ambiente*. Ed. RT. São Paulo, Brasil. 2000.

NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements). *Advances in Consequence Management for Radiological Terrorism Events*. 40th Annual Meeting . Virginia, USA. April 2 2004. Disponível em: www.ncrponline.org/Annual_Mtgs/2004_Ann_Mtg/2004_Ann_Meet_Prog.pdf . Acesso em 16 de mar. de 2012.

NGA, National Geospatial Agency, Geotrans-Geographic Translator. 2012. Disponível em: <http://earth-info.nga.mil/GandG/geotrans/> . Acesso em: 27 ago. 2012.

OGC® KML, Open Geospatial Consortium Inc. *Reference number of this OGC® project document: OGC 07-147r2, Version: 2.2.0*. Standard. Editor: Tim Wilson. 2008.

ORACLE (2011). *MySQL Enterprise Edition Trial*. Disponível em: <http://www.mysql.com/trials/> . Acesso em: 12 de nov. de 2011.

ORLANSKY I. *A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric process*. Bulletin of the American Meteorology Society. USA. 1975.

PAQUILL L. F. *Atmospheric Diffusion*. D. Van Nostrand. London, England. 1968.

PEREIRA, Wagner de S.; PY JÚNIOR, Delcy de A.; TADEI, José F. A. C.; IATESTA, Antonio. *Monitoração Ocupacional Baseada na Bioanálise de Excreta para Isótopos de Tório na Unidade de Tratamento de Minério UTM de Caldas, Minas Gerais, Brasil*. International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2005. Santos, Brazil. 2005.

RIBEIRO, Laura Alice de Araújo; e COELHO, Maysa Joppert . *Dispersão Atmosférica em Sítios de Usinas Nucleares*. Revista Militar de Ciência e Tecnologia Volume: 25 , Edição: 1 ° Quadrimestre. Rio de Janeiro, Brasil. 2008.

SILVA, Tadeu Augusto de Almeida ; FARIAS, O. L. M. *Employing Software Multi-Agents for Simulating Radiological Accidents*. In: 9th International Conference on Enterprise Information Systems - ICEIS 2007. Funchal, Madeira, Portugal. 2007.

SOARES FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C. *DINAMICA: A new model to simulate and study landscape dynamics*. Ecological Modeling. 2002.

SOUSA, A. C. A. *A evolução da política ambiental no Brasil do século XX*. Revista de Ciência Política (ISBN 1677-8855). Disponível em: <http://www.achegas.net> . Número 26 - NOVEMBRO / DEZEMBRO 2005. Acesso em : 12 de ago. de 2011.

SPIEER, Murray R.; STEPHENS, Larry J. *Estatistical*. Coleção Schaum, Bookman. USA. 2009.

TAUHATA, Luiz, SALATI, Ivan, DI PRINZO Rato, DI PRINZO Antonieta. *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*. Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD. Rio de Janeiro, Brasil. 2002.

TURNER, D. B. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling*. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, USA. 1994.

UNITED NATIONS. *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly*. New York , USA. 2000.

WIERSMA, G. Bruce. *Environment Monitoring*. CRC Press. USA. 2004.

WIKIPEDIA , 2007. *Geodetic System*. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Geodetic_system . Acesso em 27 de jun. de 2012.

WINIAREK , Victor; BOCQUET ,Marc; ROUSTAN ,Yelva; BIRMAN ,Camille; TRAN, Pierre, 2011. *Atmospheric dispersion of radionuclides from the Fukushima-Daichii nuclear power plant* . CEREAs, joint laboratory École des Ponts ParisTech and EdF R&D, Disponível em: <http://cerea.enpc.fr/fr/fukushima.html>. Acesso em 09 de mai. de 2012.

WINNER, N. *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and Machine*. MIT Press. Cambridge, MA. 1948/1961.

WOLFRAM, S. *A new kind of science*. Wolfram Media, Incorporated. USA. 2002.

WOOLDRIDGE, M.J. *An Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons. London, England. 2002.

WOOLDRIDGE, M. J., JENNINGS, N. R. *Agents Theories, Architectures, and Languages: a Survey*. Proceedings of ECAI'94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages. USA. 1995.

WNA ,World Nuclear Association. *World Nuclear Power Reactors and Uranium Requiriments*. Disponível em:<http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html> . Acesso em 06 de abr. de 2012.

YABLOKOV, Alexey V. ; NESTERENKO, Vassily B.; NESTERENKO, Alexey V. *Chernobyl - Consequences of the Catastrophe for People and the Environment*. Annals of the New York Academy of Sciences. VOLUME 1181. New York, USA. 2009.

VELDKAMP A.; FRESCO, L. O . *CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects*. Ecological Modeling 85, pp.253-270. USA. 1996.

VERBURG, P. H.; SOEPBOER, W.; VELDKAMP, A.; LIMPIADA, R.; ESPALDON, V.; MASTURA, S. S. A. *Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model*. In Environmental Management, Vol. 30, No. 3, pp. 391-405. USA. 2002.

ZINN, Noel. 2011. *Ellipsoidal Orthographic Projection via ECEF and Topocentric (ENU)*. Disponível em :
<http://www.hydrometronics.com/downloads/Ellipsoidal%20Orthographic%20Projection.pdf> . Acesso em: 27 de jun 2012.

APÊNDICE A - Tela de login do sistema AVSAR

AMBIENTE VIRTUAL DE SIMULAÇÃO DE ACIDENTES RADIOLÓGICOS



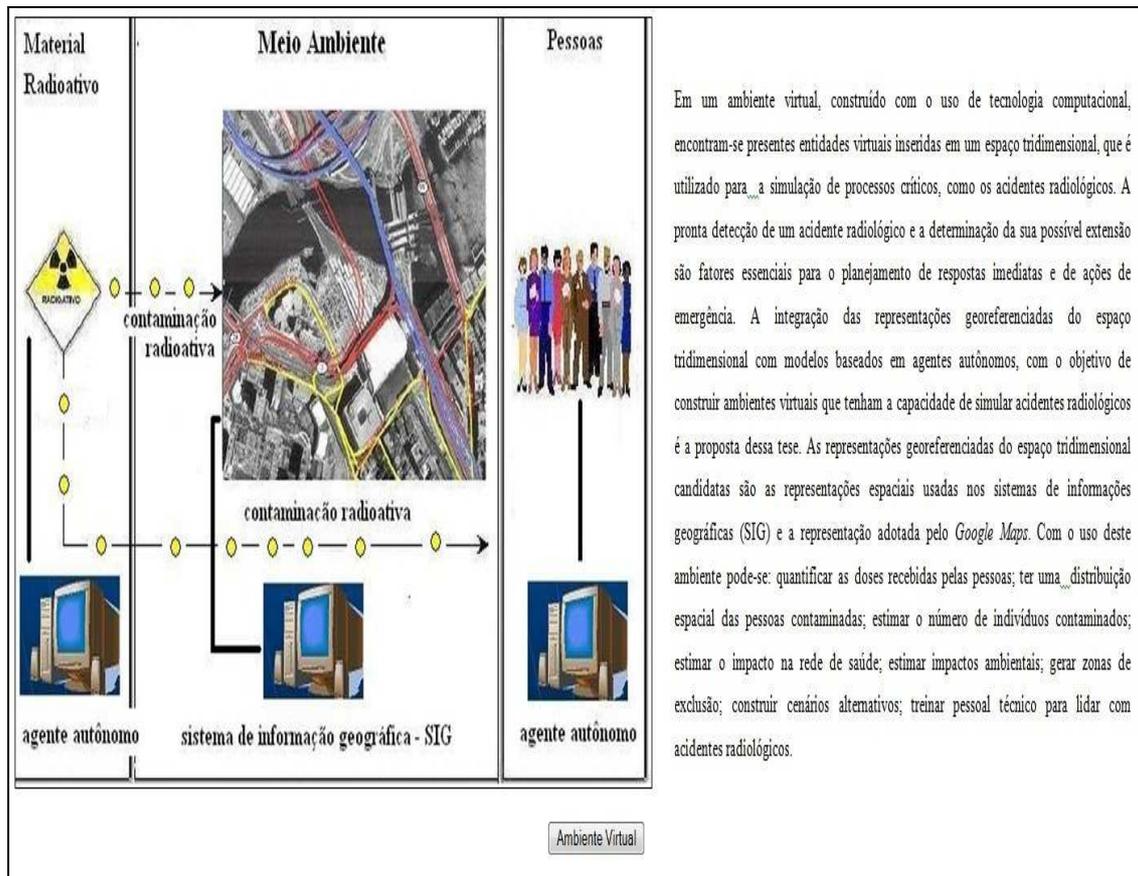
Google

Usuário *

Senha: *

Ok Sair

APÊNDICE B - Tela de apresentação do sistema AVSAR



APÊNDICE C - Api Google Maps™ do sistema AVSAR

AVSAR - AMBIENTE VIRTUAL DE SIMULAÇÃO DE ACIDENTES RADIOLÓGICOS

Fonte Radioativa Genérica	Fonte Radioativa Definida	Zonas Exclusão	Público: cálculo de dose
Metró: % Público Irradiado	Metró: Doses Efetivas	Pluma Radioativa	Limites de Doses Anuais
Procedimentos de Emergência	Enviar SMS	Gravar Mapa	Limpar

Áreas Contaminadas Configuração



Google

Dados cartográficos ©2012 Google, MapLink - [Termos de Uso](#)

APÊNDICE D - Dose efetiva de fonte genérica do sistema AVSAR

AVSAR - AMBIENTE VIRTUAL DE SIMULAÇÃO DE ACIDENTES RADIOLÓGICOS

Mais resultados

Doses Efetivas	Efeitos Físicos
> 2.5e+06 mSv	Vômitos, náuseas. Risco a longo prazo do câncer.
2.5e+06 mSv - 5e+06 mSv	Sangramento, vômitos, perda de cabelo, as mortes de 10-30%
5e+06 mSv - 4e+07 mSv	Destruição da medula óssea, coma, as mortes de 50-70%
7.3e+07 mSv	Mortes de 100% dentro de 24 horas

Google

APÊNDICE E - Pesquisa de instalações do sistema AVSAR

AVSAR - AMBIENTE VIRTUAL DE SIMULAÇÃO DE ACIDENTES RADIOLÓGICOS

Fonte Radioativa Genérica

Fonte Radioativa Definida

Zonas Exclusão

Público: cálculo de dose

Metrô: % Público Irrradiado

Metrô: Doses Efetivas

Pluma Radioativa

Limites de Doses Anuais

Procedimentos de Emergência

Enviar SMS

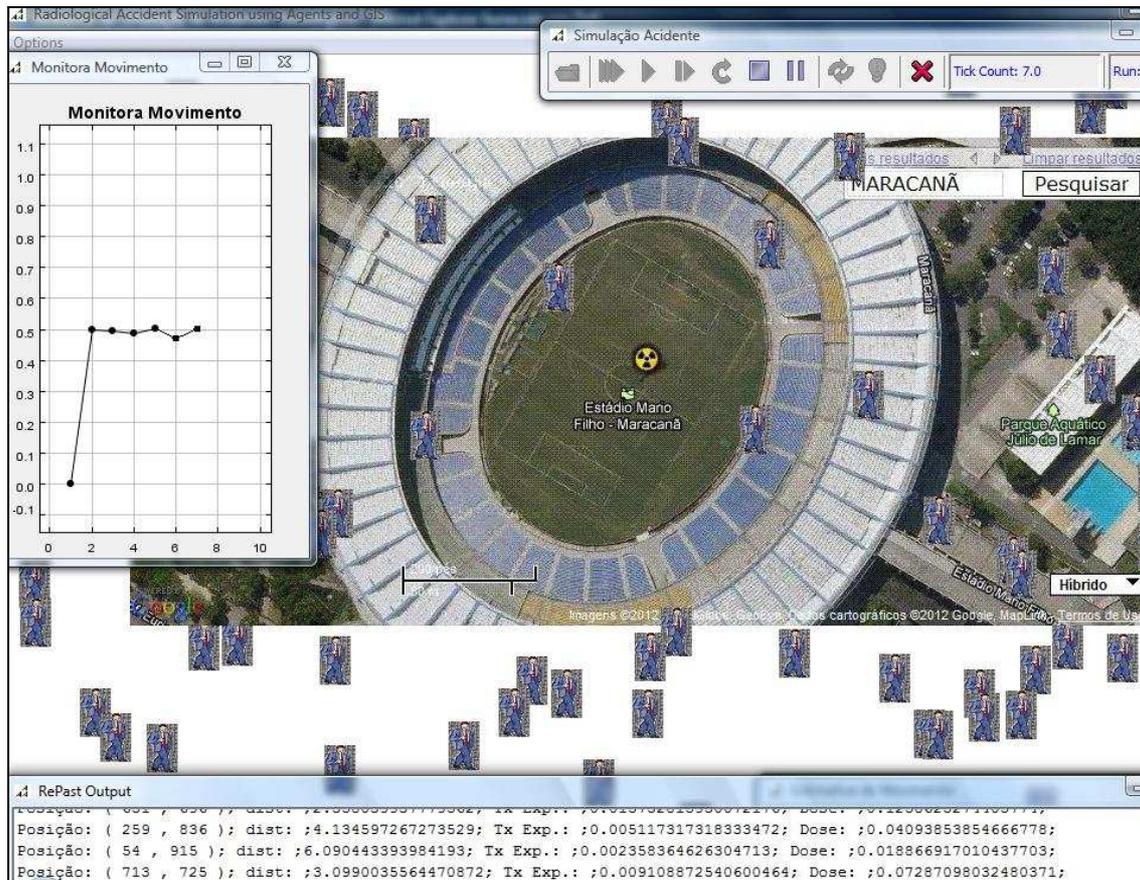
Gravar Mapa

Limpar

Áreas Contaminadas
Configuração

APÊNDICE F - Simulação dos agentes usando RepastTM do sistema AVSAR

APÊNDICE G - cálculo da dose usando o Repast3TM do sistema AVSAR



APÊNDICE H - Enviar SMS do sistema AVSAR



APÊNDICE I - Acesso aos procedimentos de emergência do sistema AVSAR

The screenshot displays a Windows desktop environment. On the left, the AVSAR - AMBIENTE VIRTUAL application is visible, featuring a search bar and a list of schools in Rio de Janeiro. The main window is a web browser showing the Radiation Emergency Medical Management (REMM) website. The browser's address bar shows the URL <http://www.remm.nlm.gov/>. The website header includes the U.S. Department of Health & Human Services logo and the title "RADIATION EMERGENCY MEDICAL MANAGEMENT". The main content area is divided into sections for "WHAT KIND OF EMERGENCY?", "PATIENT MANAGEMENT", and "FEATURES".

AVSAR - AMBIENTE VIRTUAL Interface:

- Fonte Radioativa Genérica
- Metrô: % Público Irradiado
- Procedimentos de Emergência
- Áreas Contaminadas
- Configuração

REMM Website Content:

U.S. DEPARTMENT OF HEALTH & HUMAN SERVICES
RADIATION EMERGENCY MEDICAL MANAGEMENT
 Guidance on Diagnosis & Treatment for Health Care Providers

SEARCH

WHAT KIND OF EMERGENCY? INITIAL INCIDENT ACTIVITIES PATIENT MANAGEMENT MANAGEMENT MOD

WHAT KIND OF EMERGENCY?

- Radiological Dispersal Devices: Dirty Bomb, Other Dispersal Methods
- Radiological Exposure Devices: Hidden Sealed

PATIENT MANAGEMENT

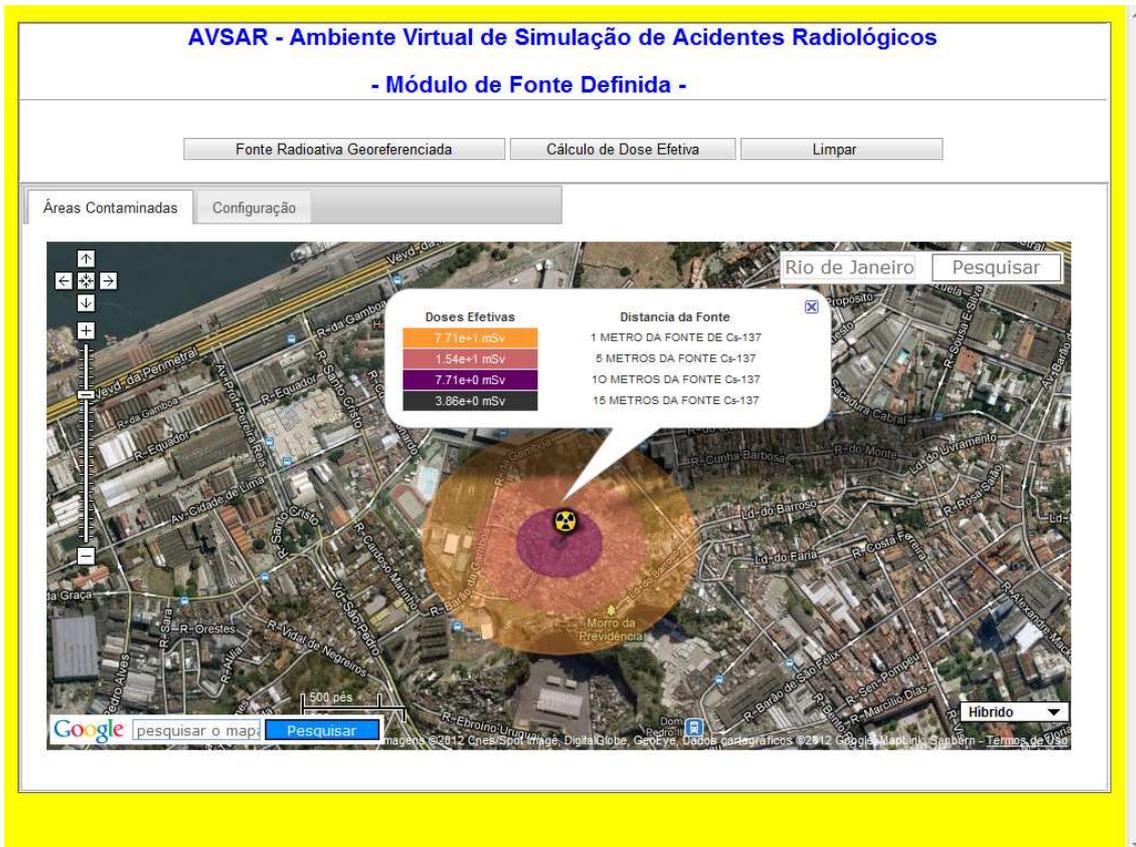
- Choose Appropriate Algorithm: Evaluate for Contamination/Exposure
- Contamination
- Exposure (Acute Radiation)

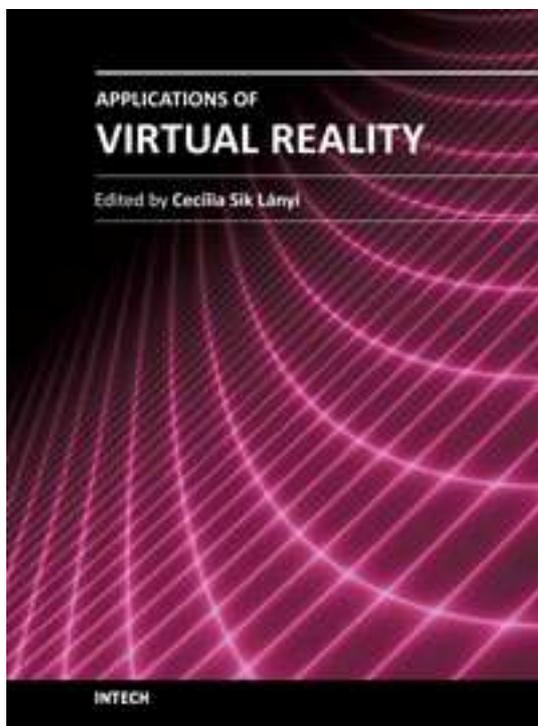
FEATURES

- Population Mo...
- Radionuclide C...
- Following a Ra...
- Incident (NCRF 2011) **NEW!**
- Nuclear Deton...
- Resources Wol...

The desktop taskbar at the bottom shows the following applications: Capitulos_v173 [Mo..., AVSAR - Ambiente..., Radiation Emergenc..., Desktop, and a system clock showing 02:41.

APÊNDICE J - Fonte definida georeferenciada.do sistema AVSAR





Applications of Virtual Reality

Edited by [Cecilia Sik Lanyi](#), ISBN 978-953-51-0583-1, Hard cover, 210 pages, Publisher: InTech, Published: May 02, 2012 under [CC BY 3.0 license](#), in subject [Human-Computer Interaction](#)

DOI: 10.5772/2667

Chapter 07

Methodology for the Construction of a Virtual Environment for the Simulation of Critical Processes

Tadeu Augusto de Almeida Silva, Oscar Luiz Monteiro de Farias
Instituto de Radioproteção e Dosimetria(IRD) / Universidade do Estado do Rio de Janeiro(UERJ) / Brasil

1. Introduction

In the so-called real world, any given process occurs simultaneously with a myriad of other processes. All these processes take place on a *continuum* of mass, energy and time (*the world*). All things in this *continuum* are interlinked in some way. Defining a process as such is in itself already an act of abstraction. One way to study a process is to split it into three entities: the observer, the process itself and the rest of the continuum. The observer usually simplifies a process in his or her attempt to understand it. The observer considers some factors and variables as taking part in the process while ignoring or excluding others. All the variables involved in a given process form a type of microcosm. Using the scientific method, researchers aim to determine laws that govern the interplay among certain entities. To this end, different models and techniques may be used.

A virtual environment is a computer environment. It represents a subset of the real world, where models of real world variables, processes and events are projected onto a three-dimensional space. The creation of a virtual environment is an important tool for simulating certain critical processes, especially those in which human beings or things are likely to suffer irreversible or long term damage. This methodology combines a representation of the three-dimensional space with geographic references, the agent-based models, and an adequate representation of time, and aims to construct virtual environments able to simulate phenomena or processes. The three-dimensional geo-referenced representations of space can either be the spatial representation of traditional geographical information systems (GIS), or the representation adopted by Google Maps™ (Google, 2011). Adding autonomous agents to these spatial representations allows us to simulate events, measure any variable, obtain a possible spatial distribution

of people and objects, estimate any environmental impacts, build alternative scenarios and train staff to deal with these critical processes.

2. The architecture of a virtual environment using an agent-based system (ABS) and a geographical information system (GIS)

Simulation is the process of building a model of a real system and conducting experiments with this model, in order to understand the behavior of the system and / or to evaluate how it operates.

Simulations can be used to describe and analyze the behavior of a system, answer questions about it and help to design a system as it exists in the real world. Both real and conceptual systems can be modeled through simulation (Banks, 1998).

Choosing a tool that enables an effective visualization of the results of a simulation is the primary goal in building a virtual environment. Ideally, the architecture of such environments should allow for the presence of sets of concurrently interacting agents which can be monitored.

The implementation of models for elaborate and dynamic systems is a highly complex task since there is no tool that permits to describe, simulate, and analyze the system under study without the need of advanced knowledge of mathematics and programming.

Through the tool of simulation, it is possible to build and explore models that help people gain a deeper understanding of the behaviour of a specific process or system.

The advantages of using simulation include:

- Informed decision-making: a simulation permits implementing a range of scenarios without consuming any resources. This is critical because once a decision to implement a policy is taken in the real world, material and human resources are used, thus generating costs.
- The compression or expansion of time: a simulation can compress or expand the duration of a process or phenomenon, in order to allow a complete and timely analysis of it. One can examine a problem in minutes instead of spending hours observing it while all events unravel.
- In order to fully understand a phenomenon, it is generally necessary to know why, where and when it occurs in the real world. Thanks to simulation, it is possible to get answers by reconstructing a scenario and subsequently carrying out a microscopic analysis. In the real world, it is often very difficult to do this, because it is impossible to observe or control the system completely.
- Problem diagnosis: dynamic phenomena have a high degree of complexity; one advantage of simulation is that it allows us to understand the interactions among the different variables. This helps in the diagnosis of problems and enables researchers to have a better understanding of the process.
- Preparation for change: it is a fact that the future brings changes. Understanding in advance "why" and "how" these changes will take place is very useful in redesigning systems / existing processes and predicting behaviour in accordance with different scenarios.
- Training staff: simulation models are excellent training tools when designed for that purpose. Used as such, staff and teams can come up with solutions and evaluate their mistakes by comparing each proposed scenario.

Some disadvantages of simulation are as follow (Banks, 1998):

- The construction of an effective model is a form of art: it requires special training garnered over time and experience. If two models of the same system are built by two distinct and competent technicians, these may be similar, but they are unlikely to be identical.
- A simulation can be difficult to interpret: when most of the simulation outputs are random variables, the results can be very difficult to analyze.
- Modeling and analysis can be time consuming and expensive.

The goal of the proposed architecture of a virtual environment (VE) is to construct scenarios to analyze the information related to given critical processes (Figure 1).

The models, built to represent different processes, phenomena or systems, are based on the behaviour of objects over time. Eventual movements of people or objects are taken into account, both of which are represented by an agent-based system (ABS). The spatial area will also be incorporated into the model using a geographic information system (GIS).

Typical autonomous agents, in an agent-based system (ABS), have some state variables, which determine their situation in the systems, and some of their behaviour, in the same way as object methods in object-oriented programming. A typical autonomous agent, that represents a person in some process, has the following state variables: i) a personal identity; ii) a position given by a set of coordinates (x, y, z); iii) a direction or angle relating to the true north; iv) a speed. Its behaviour could involve: i) moving to some position; ii) speeding up or slowing down.

The proposed virtual environment (VE) must include an appropriate representation of the space or environment in which these autonomous agents receive sensory inputs and produce outputs in the form of actions. In general, geographic information systems (GIS) use raster or vector structures to represent space in bi-dimensional models. In some cases, a third dimension is represented through the digital elevation models (DEM) of a terrain. A given GIS spatial representation (a shape file, for example) can integrate an agent-based system (ABS) and the structure of a dynamic spatial model, incorporating the dimension of time, in order to simulate a dynamic phenomenon. The GIS spatial representation is the environment in which autonomous agents of these ABS models will operate.

For each specific phenomenon, we are only interested in particular information about the environment. So, considering the geographical space where the phenomenon develops, it is necessary to filter only the aspects of interest to the study. These factors are perceived by the autonomous agents, thus causing their actions. The data is organized in different layers, each layer representing different elements such as: utilities, river and lakes, roads and rails, soil maps, land parcels, etc. It is necessary to select only the elements or layers that are of interest to the study. Objects that are not of interest must be eliminated. An environment full of superfluous objects would unnecessarily complicate the modelling and reduce its effectiveness. So, depending on the problem, it is necessary to considerably simplify the simulation, as has been done in the proposed architecture (De Almeida Silva & Farias, 2009; Farias & Santos, 2005).

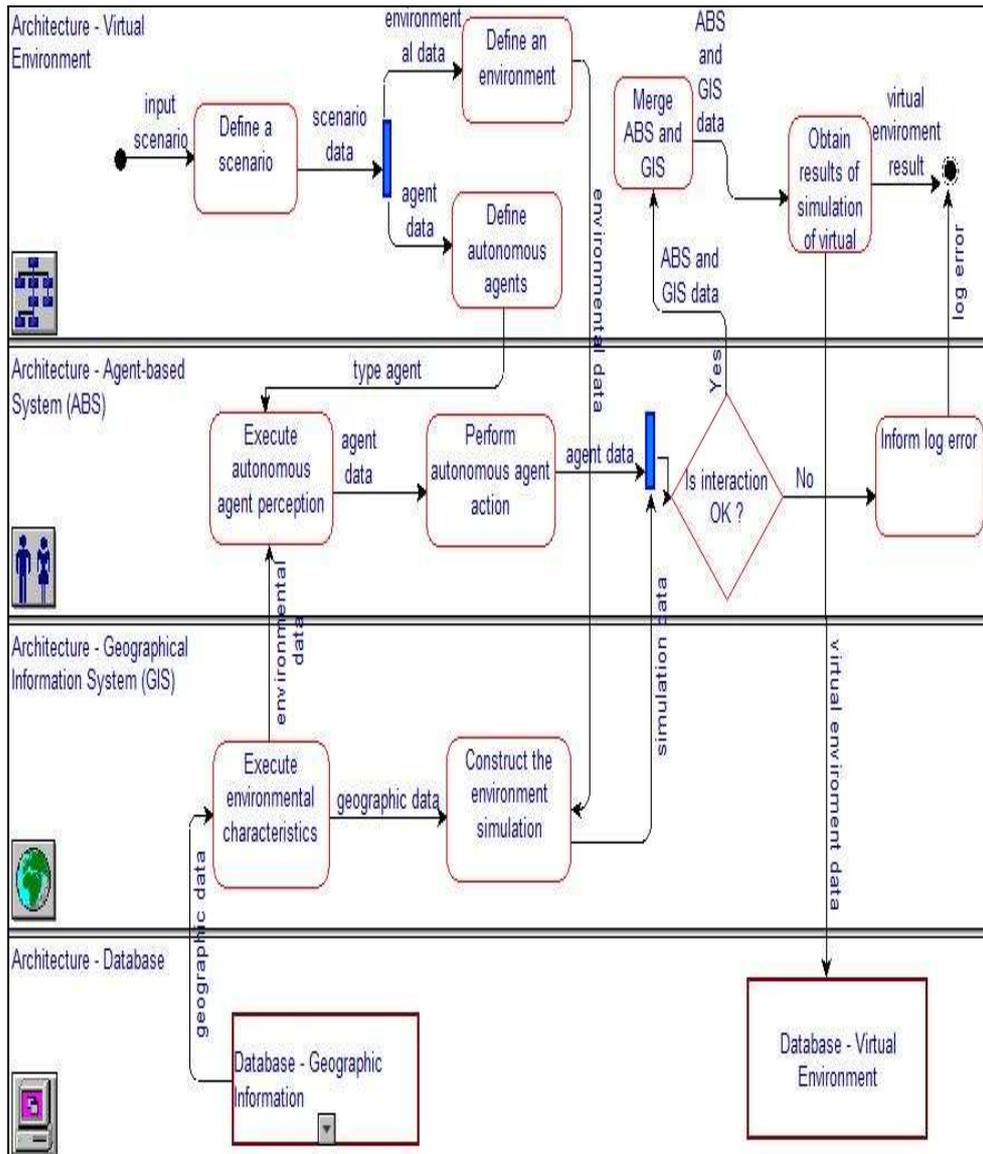


Figure 1- The architecture of a virtual environment (VE)

In dynamic spatial models, in particular cellular automata models (Lim et al., 2002), it is common to represent space as a cell-based or raster structure (Veldkamp & Fresco, 1996; Verburg et al., 2002; Soares Filho & Cerqueira, 2002; Lim et al., 2002). Time is characterized as an incrementing value of a variable t (each increase corresponding to a simulation cycle). At the start of the simulation (when $t=t_0$), the system will be initialized with all data describing the phenomenon or process under study as seen in the state $t=t_0$. Following this, the simulation as such begins (Figure 2).

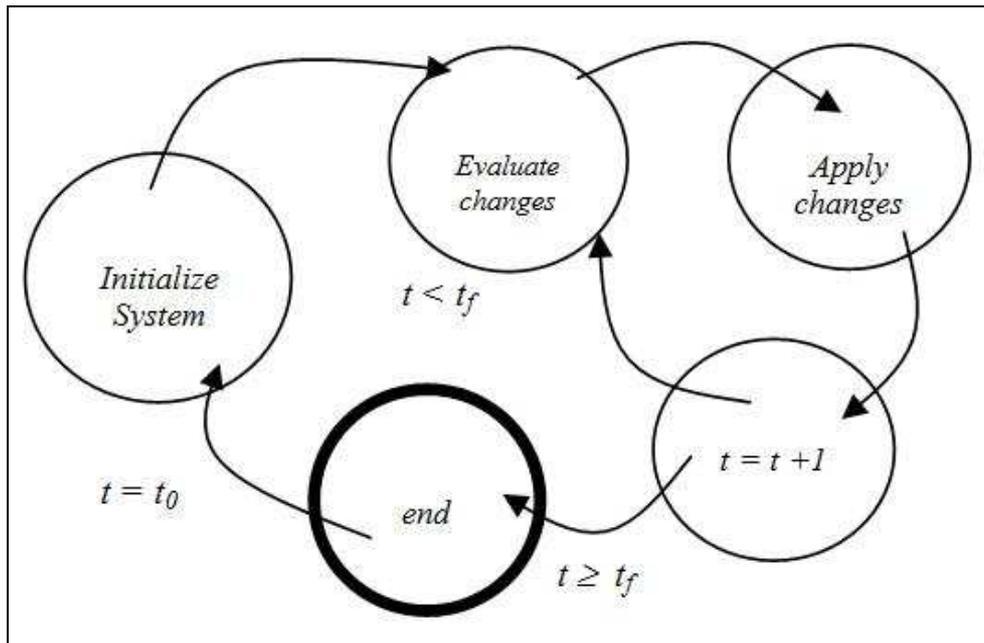


Figure 2- A common structure of dynamic spatial models.

In the first step, it is possible to analyze, given some inputs and/or a particular configuration of cells, which cells should have their attributes changed. In the second step, certain rules are applied to the cellular automata, in order to alter its structure. In the third step, the t variable is incremented; if this t variable is less than a pre-determined value t_f - which represents the total time of the simulation - the simulation returns to the first step and the whole cycle repeats itself; otherwise the simulation ends.

This structure of dynamic spatial models can be adapted to a GIS to represent the iterative cycles during which knowledge about the environment is acquired (in other words, sensed and perceived) by the agents who then act correspondingly.

2.1 The characteristics of agent-based systems (ABS)

For thousands of years people have created models to help them understand the world. These models not only help them to better understand the phenomena they study, they also help them to transmit their ideas to other people. Through computational simulation of agent-based systems (ABS), people can better understand the effect of a specific phenomenon in an environment under study, which makes it easier to determine the consequences and risks involved.

The idea of an abstract automaton was developed in the work of Alan Turing on the development machine (Levy, 1992). The cellular automaton was popularized by John Von Neumann and Stanislaw Ulam in 1950 through the development of the tessellation model (Levy, 1992). The idea of connecting and interacting spatial units was developed by Norbert Wiener in his work on cybernetics (1948/1961) (Levy, 1992). Cellular automata were originally used to describe units in a series of networks that interact with and influence each other through messages. These networks have been used to represent a series of phenomena: computing devices, neural networks, the human brain, tissue, cellular and ecological networks, etc. They were popularized in the work of John Horton Conway called *The Game of Life* (Gardner, 1971), and widely applied in the fields of physics, chemistry, biology and ecology (Wolfram, 2002).

(An entity represents an object that requires an explicit definition.) An entity can be dynamic, meaning it moves through the system, or it can be static and play a complementary role in others' tasks. An entity has specific attributes that distinguish it from others. Like state variables, the attributes defined and used for a particular research interest may not be applicable to other investigations.

The word "agent" refers to all beings that possess the capacity to act on its own and others' behalf. Representing humans, agents would be people with more knowledge or a more specialized capability in a determined area, which enables them to help other people accomplish their tasks. For example, a secretary makes decisions and deals with particular situations on behalf of her boss, saving him or her

from having to carry out certain tasks, such as scheduling appointments and meetings, etc. (Wooldridge & Jennings, 1995).

Autonomous agents, or agents, are the software equivalent of real world entities such as human beings, animals, viruses, ships, cars, etc. For this reason, there exist several definitions for autonomous agents arising from authors' perspectives on the subject (De Almeida Silva & Farias, 2009; Farias & Santos, 2005). Here is one definition (Wooldridge & Jennings, 1995): "A system situated within a given environment, which senses that environment through its perception mechanism and acts on that environment and/or on other agents, as time flows, in pursuit of its own agenda, plans or beliefs. Eventually the agent's perception/action mechanism evolves with time" (Figure 3).

Autonomous agents can be classified according to their amplitude of perception, their capacity to act and the effectiveness of their action. There exist reactive and cognitive agents. Reactive agents merely react—in an opportune way, according to very simple behaviour patterns—to changes in the way they perceive their environment. Cognitive agents are more complex. They not only interact with their environment, but are also capable of remembering previous experiences, learning from these, communicating with one and another, and finally of following a defined goal, strategy or plan.

Multi-agent systems (MAS) are composed of several agents, which, in addition to having the above mentioned characteristics, can interact with one another through communicative mechanisms. In most cases, these autonomous agents can exhibit great variation and display competitive or collaborative behaviour, depending on the context (Wooldridge & Jennings, 1995).

Simulations, using Multi-agent systems (MAS), provide a computational platform in which the dynamic of spatial-temporal systems can be studied. To do this, it is possible to use reactive (simpler) or cognitive (more complex) autonomous agents (Figure 4) (Benenson & Torrens 2004; Wooldridge & Jennings, 1995).

It can also be said that an autonomous agent is a computer system situated in an environment, and that is capable of autonomous action within it, in order to meet its design objectives. For it to be autonomous, the system should be able to act without any direct human (or other agent) intervention, and should have control over its own actions and internal state (Longley & Batty, 2003).

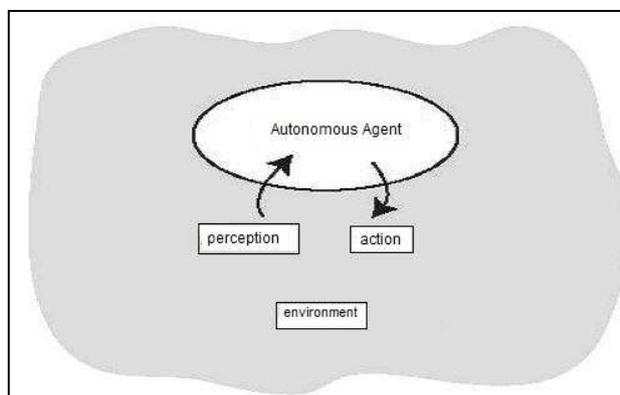


Figure 3- An Autonomous Agent

An autonomous agent exhibits the following properties:

- i. Social ability: agents should be able to interact, as deemed appropriate, with other artificial agents and humans in order to carry out their own problem solving and help others with their activities. This requires agents to follow certain communication mechanisms;
- ii. Responsiveness: agents should perceive their environment and respond in a timely fashion to changes which occur within it;
- iii. Proactiveness: agents should not simply act in response to their environment; they should be able to exhibit opportunistic, goal-oriented behaviour and take the initiative when appropriate.

In addition to these conditions, a number of other potentially desirable characteristics have been proposed. These include: adaptability - the ability of an agent to modify its behaviour over time in response to changing environmental conditions or an increase in knowledge about its problem solving role; mobility - the ability of an agent to change its physical location to enhance its problem solving; veracity - the assumption that an agent will not knowingly communicate false information; and

rationality - the assumption that an agent will act in order to achieve its goals and will not act in such a way as to prevent its goals being achieved without good cause (Maguire et al., 2005).

It is possible to model the behaviour of people in some determined environment through the computational technology of agents, as well as consider other elements that interact with these people using this same technology, observing their behaviour and the consequences of these interactions. An environment can be created where software agents simulate critical process. The agents will have some properties such as: mobility, reactivity and objectivity. People, objects and elements will be also represented by software agents. In this way, it is possible to study, analyse and manage the critical process through agent-based simulation.

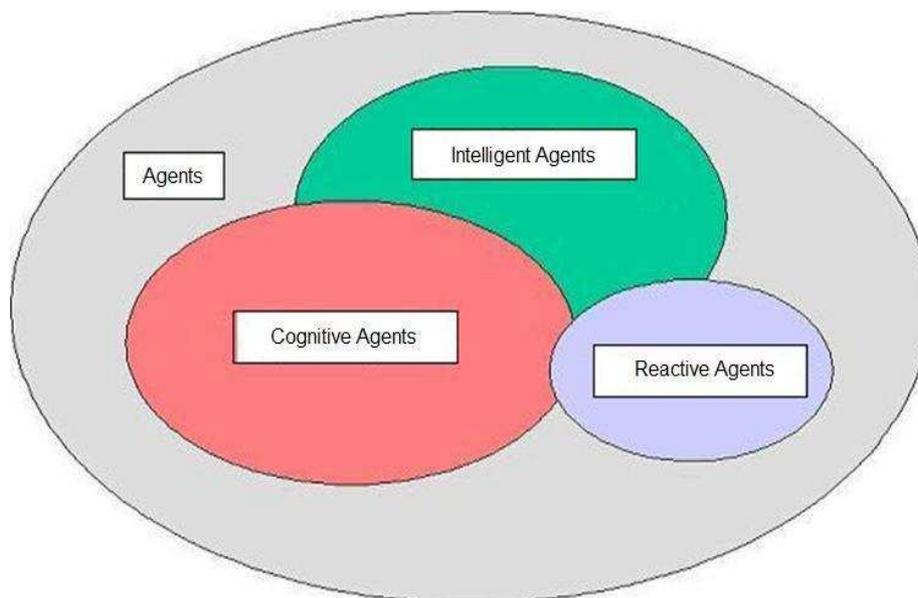


Figure 4- Types of Agents

2.2 Fundamentals of geographic information systems (GIS)

The record of spatial phenomena through predetermined coding has enabled the creation of a model distribution of natural phenomena and human settlements, which has become very important in thinking about population distribution, environmental analysis, navigation, trading routes and military strategies.

Geographic information systems (GIS) are systems that store, manipulate, analyze and display data that is mapped in a geographic coordinate (or geo-referenced) system. The information is encoded in the GIS through geographic features such as points, lines, and areas or through digital data which stores data as pixels (picture element cells) in a two-dimensional array.

Understanding how to use GIS is not simply understanding how to use of maps, it is necessary to see how a person views the world, what models are used to represent what is observed and what types of coding are used to represent them. The representation of a map in GIS can be regarded as a visual projection of a spatial database at a given time (Burrough, 1998).

The model used in a GIS program consists of a series of entities that are described by their properties and are mapped using a geographic coordinate system. These entities are points, lines and polygons. In order to represent some region of the earth, for example, it is possible to associate these entities to real world object—like rivers, mountains, cities, buildings, etc.— and define their attributes, boundaries and location.

The systematic use of GIS enables the building of very huge spatial databases. Data can then be displayed through maps, charts or graphs. Thematic maps compile information related to a specific subject. This facilitates the storage of a large volume of data relevant to a particular phenomenon under study.

The basic functions of GIS are to: (Burrough, 1998):

- Show the location of an entity;
- Show the distance between an entity and a place;

- Calculate the number of occurrences of an entity;
- Calculate the size of an area;
- Allow the crossing of various spatial data;
- Determine the best route from one point to another in a geographic area;
- List the attributes of an entity located a certain points;
- Reclassify or recolor entities that have similar attributes;
- Know the value of an entity at some point and be able to predict its value at another point;
- Simulate the effect of a process over time for a given scenario;

It is necessary to use a specific technique in order to build spatial data models and their data structures used in GIS. This technique allows researchers to describe the geographical phenomenon and consists of the following steps (Burrough, 1998):

- i. The construction of the real world model (view of reality);
- ii. The construction of the conceptual model (human analog abstraction);
- iii. The construction of the spatial model (formalized abstraction without following any convention);
- iv. The construction of the data model (that reflects how the data will be stored on the computer);
- v. The construction of the physical computer model (How the files are organized on the computer);
- vi. The construction of the model defining data manipulation (the rules for data processing);
- vii. The construction of the GUI model (the rules and procedures for displaying spatial data);

Geographic information systems (GIS) and its survey methods and software, have been used in different fields. It is possible to use GIS for any activity that requires geo-referenced information (location in geographical space). The potential of remote sensing and GIS facilitates the planning, control and management of large geographical areas.

Compiling geo-referenced data enables temporal and spatial analysis and provides parameters for implementing management programs in certain areas (Figure 5).

In areas where there is a critical process, a geo-referenced map can reveal the extent of the process, existing landforms, roads, cities, and even streets and buildings. These data allow for a detailed analysis of the critical process at hand and its potential impact on an urban area.

GIS works by combining tabular data with spatial data. The structures of the raster (satellite imagery) and vector (point, line and polygon) data types are used to digitally represent spatial objects. The vector structures identify vector space objects by points, lines or polygons (two-dimensional space). This type of identification is combined with the elaboration of a polygon "background", which complements the coverage of the entire plan information. The raster structure (or matrix) uses discrete units (cells) which represent spatial objects in the form of clusters (aggregates of cells). In this way, it is possible to see layers of spatial data and their link with tabulated data (roads, buildings, population, plantations, railways, ports, airports, consumers, buildings, water networks, etc.). Therefore, GIS permits researchers to represent the real world through various aspects of geography, which are separated into thematic layers.

For the GIS technology to be used effectively, it is necessary to define a methodology which represents the geographical area under study and to select the main variables to be analyzed.

This methodology consists of the following steps:

- Elect the study area (define its limits);
- Define the sources of information;
- Collect data;
- Analyze the data collected;
- Provide geo-referenced data;
- Manage the use of information.

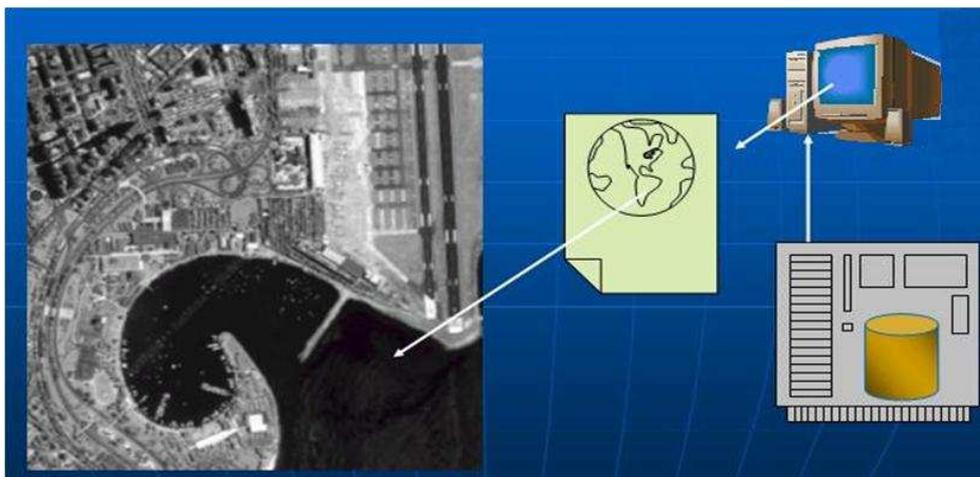


Figure 5- A geographical information system (GIS)

Information systems are widely used by organizations to manage their critical data. Through systems-based database, a large volume of information can be stored in different business areas. The so-called spatial data refer to information in a defined geographical area (latitude, longitude, topography, hydrography, land, cities, population, agricultural production, infrastructure, etc.). These data are managed by geographic information systems (GIS). The GIS provides not only the spatial view of a given area, but also the data about it across time, thus allowing researchers to gain a better understanding and to make more informed decisions. All data are geo-referenced and stored in spatial databases. In this way, GIS makes it possible to register, view, index, standardize and map a large volume of information about an existing geographic area.

2.3 Merging an agent-based system (ABS) with a geographic information system (GIS)

When a phenomenon is too complex to be studied analytically, it is necessary to recreate it in an artificial universe in which experiments can be made on a smaller scale and in an environment that simulates the real world but where the parameters can be controlled with greater precision (Drogoul & Ferber, 1994).

Computer models can be used to understand more about how real world systems work. These models allow researchers to predict the behavior of a wide range of real world processes and understand their structure. Computational models reduce the cost and time of conducting actual experiments, which are often impossible to execute in the real world. Simulations can be repeated many times over and are not invasive. The data generated by computer models are easier to analyze than that of real-world systems. (Gimblett, 2002).

A process is deemed critical when it presents complex behaviour over time. Examples of critical processes are population growth, radioactive accidents, chemical accidents, soil erosion, movement of rivers, epidemic diseases, pests, forest fires, slums in urban areas, vehicle traffic in urban areas, climate change and animal migration. These processes provoke critical effects on the population, the surrounding environment and geographical areas, which must be analyzed and mitigated in order to minimize any pre-existing vulnerability (De Almeida Silva & Farias, 2009).

One significant development in the creation of simulation models has been the inclusion of intelligent agents (autonomous agents) in spatial models. This technique enables the simulation of human behaviour in the environment within which a critical process is to be analyzed and facilitates the study of simulation outcomes. (Gimblett, 2002).

The use of GIS allows a more accurate spatial representation of the environment within which autonomous agents will act, thereby representing the elementary processes that exist in the real world. The challenge is to build a simulation that enables the generation of data appropriate to an analysis of the phenomenon under study.

The use of object orientation (OO) represents a new perspective for the integration of geographic information systems (GIS) with agent-based systems (ABS). This technology enables the creation of objects that can represent entities existing in the real world in a simulation environment. The properties (attributes and methods) of these objects entities in an OO design, a modularity capacity, the low

complexity of programming code and reusability are characteristics that give great flexibility to modeling the existing elementary processes of complex processes (Gimblett, 2002).

Object orientation is a global trend in terms of programming and development systems. Applied to the area of databases, the concept of OO enables a more accurate definition of models and data structures which better represent the real world. This is especially useful to GIS, since the spatial characteristics of data make it difficult to model using traditional techniques.

The construction of a framework that represents a virtual environment is made possible thanks to the principles of object orientation (OO). The objects built following these principles provide a representation of the real world through software simulation. OO focuses on the object and represents a tool to construct it.

The two fundamental OO concepts are classes and objects. An object is an entity that has attributes and an identity. A class is comprised of objects that share common properties. OO as applied in GIS is characterized by types of objects, divided into classes, which may have a hierarchical relationship, whereby subclasses inherit the behaviour derived from the main classes (Figure 6). The geographic objects must be represented in a geographic or spatial database. A geographic object is an element that can be geo-referenced and registered into a spatial database. Such databases allow the storing, retrieving and manipulating of spatial data including descriptive attributes that form the basis for the geometric representation of a geographic space (Elmasri & Navathe, 1994).

Objects are programming codes that can represent activities, movements and properties of real world entities (people, animals, cells, insects, chemicals, vehicles, etc.). They have three fundamental characteristics: identity (which distinguishes it from other objects), attributes and methods. A class provides a template for building a collection of objects of the same type. Embedded in an environment, objects are able to simulate a phenomenon through their multiple interactions. The application of a small number of rules and laws to entities (objects) in a given space gives rise to so-called emerging systems, which are able to simulate complex global phenomena, such as vehicle traffic, the growth of cities, etc. These are systems in which the combination of objects and their interaction with the environment reproduce the phenomenon analyzed. The objects contained in these systems are adaptable and act in synergy between one another. The framework built with objects and their combination automata (abstract automaton) lets researchers explore, analyze and predict critical processes in a study.

A greater degree of realism in simulations based on agents can be achieved by integrating the technologies of agent-based systems, geographic information systems and data acquisition via satellite. In other words, the virtual environments in which the agents will act may be two-dimensional (digital maps) or three-dimensional (digital elevation models), which depict reality to a high degree of accuracy, as can be observed through tools like Google Maps™ (Google, 2011; Gimblett, 2002; Longley & Batty, 2003). It is thus possible to achieve a very accurate model environment where agents with their corresponding attributes and behaviours are positioned and interact with each other and the environment, thus simulating dynamic processes or phenomena.

The use of ABS, based on OO and set up through simple rules, should establish standards of behaviour and the fulfillment of tasks in a geo-referenced environment (GIS). The autonomous agents act and react in the geo-referenced environment in which they are immersed.

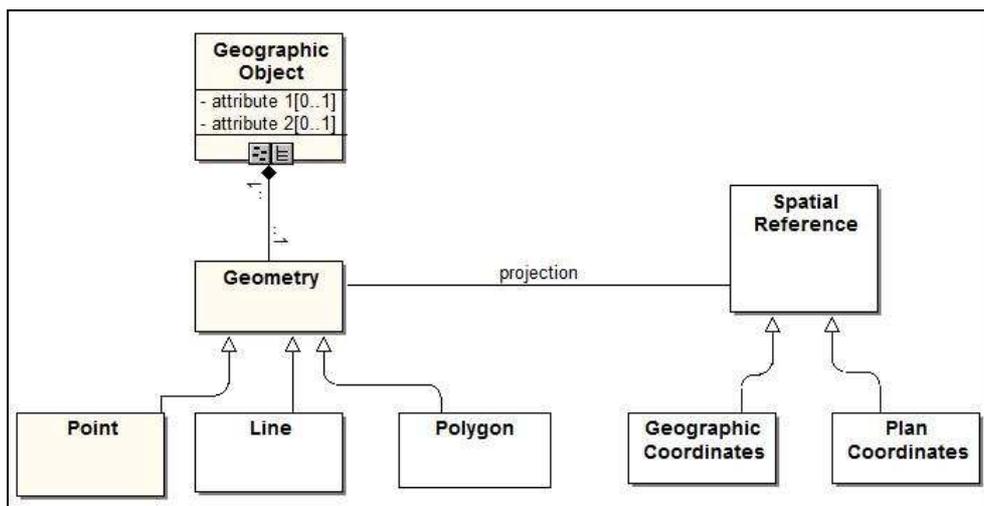


Figure 6- A class diagram of geographic object orientation

2.4 Methodology for building a virtual environment (VE)

Simulation is the process of building a model of a real system and conducting experiments with this model, in order to understand the behaviour of a complex system and to evaluate strategies for its operation. Simulation, following the proposed methodology, can be used to describe and analyze the behavior of a system, answer questions about it and help to design a better system in the real world (Banks, 1998).

The steps of the proposed methodology are:

- i. The construction of a conceptual model representing a phenomenon in the real world;
- ii. The planning of the services of the virtual environment system;
- iii. The definition of geographic entities, their methods and attributes;
- iv. The definition of autonomous agents or entities, their methods and attributes;
- v. The definition of activities and their corresponding workflows;
- vi. The definition of input and output variables;

The proposed architecture of a virtual environment (VE) requires a spatial framework for modeling a complex system. The main characteristics of the architecture of a VE are the existence of autonomous agents, existing within a geo-referenced environment which simulates the phenomenon or critical process of interest.

The autonomous agents have rules of behaviour and attributes and are capable of positioning themselves in a geographical space. A spatial database system is used to store, retrieve, manipulate and analyze data that are generated by the behaviour of these autonomous agents, through time (years, hours, minutes, and seconds). The main features of the autonomous agents, in this architecture of VE, are their ability to transmit information and to move to another position. They also demonstrate more complex behaviour, such as meeting predetermined goals and storing information. It is also necessary to consider another important feature of the autonomous agents in this architecture: their typology, the environment where they are located and the spatial relationship they have with other agents. It is important to guarantee the process that governs changes in characteristics and that which governs changes in spatial location (De Almeida Silva & Farias, 2009).

The VE architecture is composed of two categories of data: spatial data generated by Google Earth™/Google Maps™ (Google, 2011), which is used as a geographic information system (GIS) and behavioural data generated through autonomous agents. These autonomous agents are built by Repast 3™ (Argonne, 2011; North et al., 2006), a software toolkit that programs the interaction of autonomous agents in a geographic environment. Generated data are stored in a database called MySQL™ (Oracle, 2011; Appleton & Stucker, 2007), which is then used to simulate the critical process.

The proposed VE is based on autonomous agents that act within a predefined geo-referenced environment. They are able to perceive and react to stimuli. There are many software toolkits to build

multi-agent simulations such as Repast™ (Argonne, 2011), Cougar™, Zeus™, Jack™, Jade™, Swarm™, Star Logo™ and Net Logo™. In the proposed architecture, the Repast™ software was used (Argonne, 2011) for the following reasons (Figure 7):

- It integrates agents with geo-referenced information (GIS);
- Its source code is in Java™, which makes the tool highly portable;
- It is a rapid application development (RAD) tool;
- It allows for the monitoring of both the autonomous agents and the constructed model;
- It uses graphics for the output of results;
- It features a user-friendly graphical interface for the construction of agents;
- It is an open source tool that is constantly evolving;
- It is compatible with three different programming languages/frameworks: Java™ (RepastJ and RepastS), Microsoft.NET™ (Repast.NET), and Python™ (RepastPy) (Crooks, 2007);

The representation of the area selected (Google Maps™) (Google, 2011) will be the virtual environment in which entities representing objects in the real world will be inserted. The latter are abstractions, called autonomous agents, which represent different types of actors of the real world ranging from living beings endowed with a high degree of intelligence to entities exhibiting basic behaviour. The autonomous agents are able to interact with one another and are modeled as pro-active autonomous objects endowed with a greater or lesser degree of intelligence and which are able to understand the environment in which they are immersed (Wooldridge, 2002).

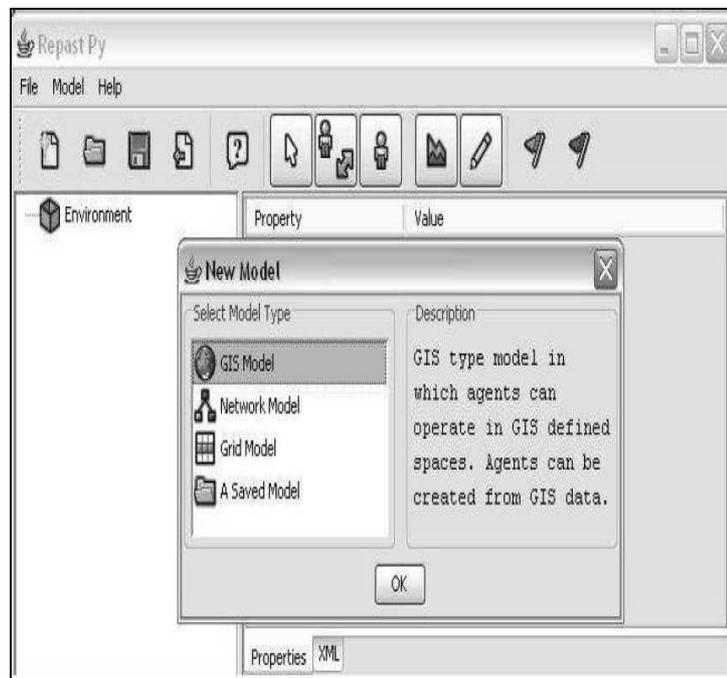


Figure 7- Simulation tool based on GIS and agents – Repast 3™

The architecture of the VE has the ability to organize and display information in a graphical interface whereby the autonomous agents are positioned arbitrarily within a spatial environment and their distribution appears on a geo-referenced map, to be viewed and interpreted (Maguire et al., 2005) (Figure 8). These objects and individuals are modeled by autonomous agents and have the following attributes:

- i. object identifier;
- ii. the object's position given by its coordinates;
- iii. individual identifier;
- iv. the individual's position given by its coordinates;

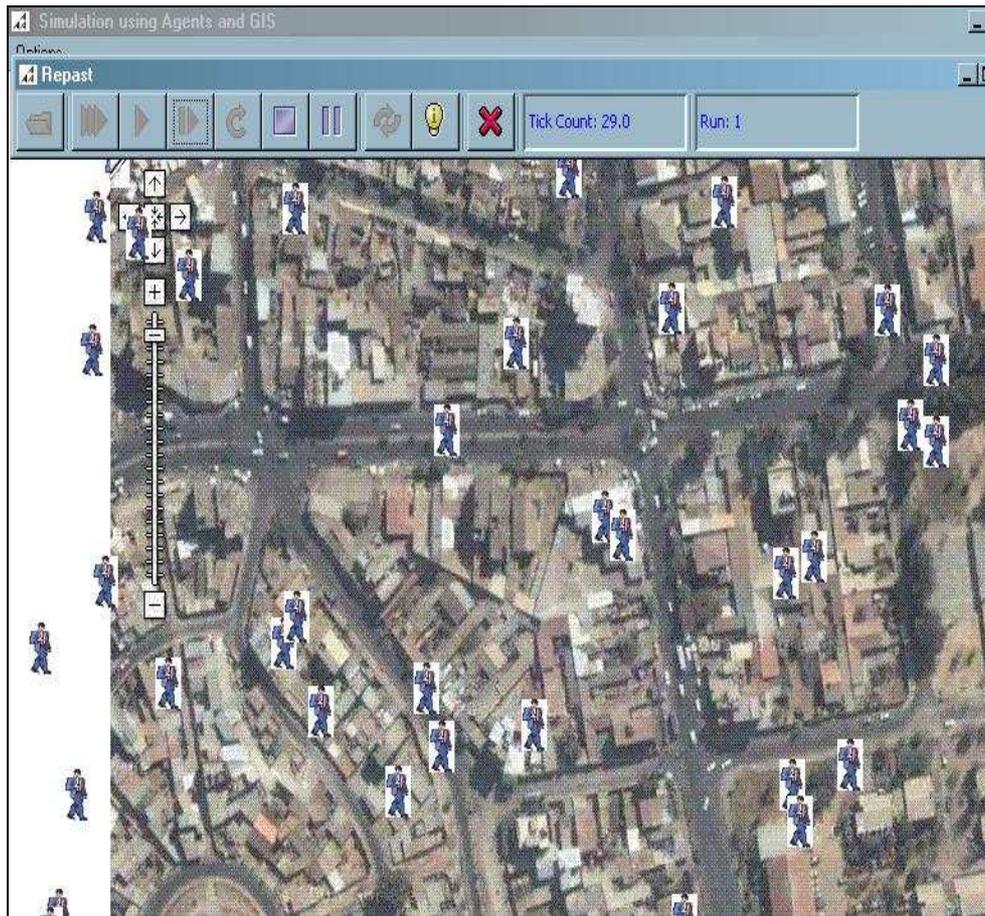


Figure 8- A virtual environment displaying autonomous agents, Google Maps™ and Repast™

For the construction of this virtual environment, the following tasks were performed (Banks, 1998):

- i. Formulation of the problem: define the problem to be studied, including the goal of the solution;
- ii. Goal setting and planning of the project: raise questions that should be answered by the simulation and the scenarios to be analyzed. The planning of the project will determine the required time, resources, hardware, software and people ware involved as well as controls and outputs to be generated;
- iii. Creation of a conceptual model: build an abstraction of the real world based on mathematical and logical modeling; Data collection: identify the data required for simulation
- iv. Building the model: create the model using a conceptual tool for simulation;
- v. Verification: Check that the implementation of this model has been done correctly;
- vi. Test of validity: verify that the model is a conceptual representation reasonably "accurate" system of the real world;
- vii. Simulation of scenarios: define various scenarios and their parameters;
- viii. Running and analysis of the scenarios: estimate measures of performance for the scenarios that are being simulated;
- ix. Documentation and report generation: provide information about the result of the modeling carried out;
- x. Recommendation: determine the actions to be taken to solve the problem that is being analyzed based on the results of the simulation.

For the implementation of this virtual environment, the following steps were performed (Figure 9):

- i. Definition of the critical process: choose a type of critical process to study (e.g. population growth, radioactive accidents, chemical accidents, soil erosion, movement of rivers, epidemic diseases, pests, forest fires, slums in urban areas, vehicle traffic in urban areas, climate change and animal migration);

- ii. Definition of a scenario: construct a conceptual model representing a phenomenon in the real world;
- iii. Planning the services of the virtual environment: define the characteristics of the system necessary to model a phenomenon (procedures, input and output variables of this system);
- iv. Construction a physical model of the database: create the structure of the files;
- v. Construction of individual autonomous agents whose goals, type, attributes and methods are defined in accordance with the analyzed phenomenon Customization of a Google Maps API: define new features for geographic representation;
- vi. Customization of Repast libraries: define the graphics and outputs;

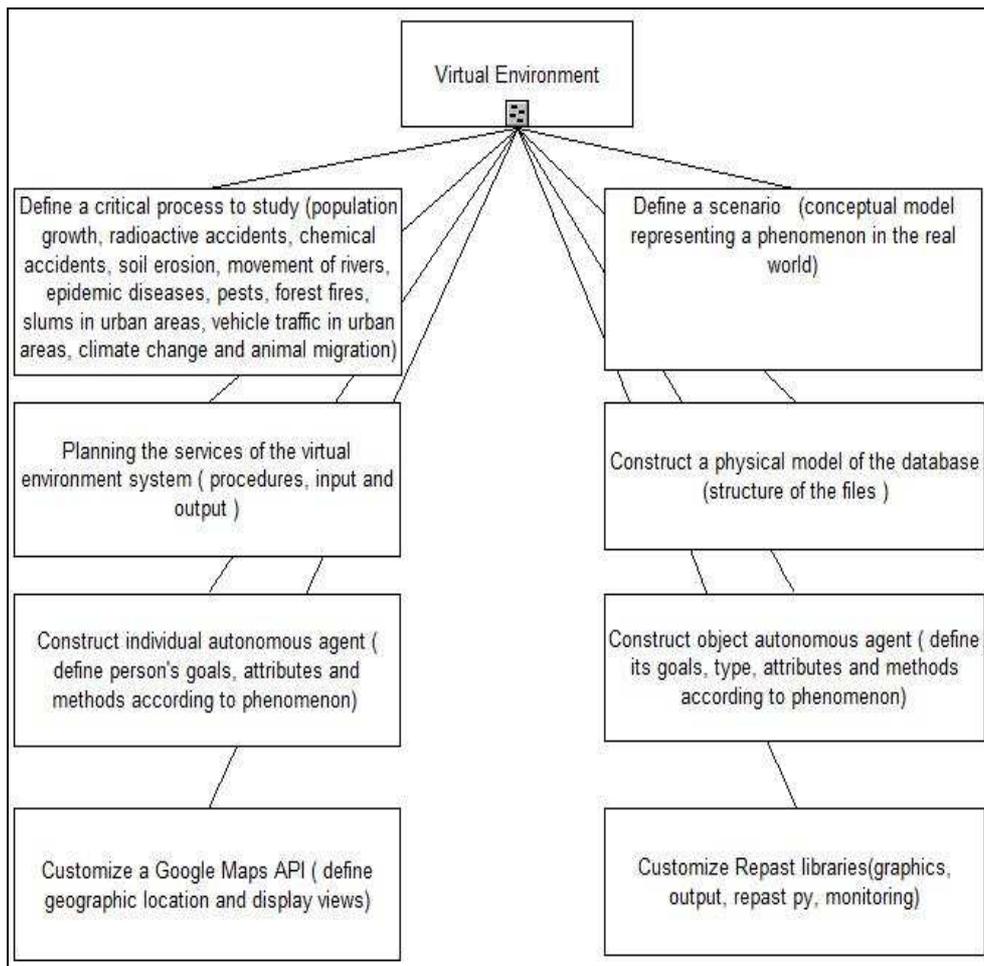


Figure 9- Methodology for the construction a Virtual Environment (VE).

3. Conclusion

The proposed methodology to construct a virtual environment (VE) for the purpose of simulating a critical process allows us to create a software simulation capable of analyzing a phenomenon that occurs in a specific geographical area. This architecture of a VE explores how systems based on autonomous agents can be effective in simulating complex phenomena. The implemented model that incorporates autonomous agents, existing within a geo-referenced environment and which capable of receiving stimuli as input and of producing actions as output, aims to simulate the dynamics of the phenomenon selected to be studied.

This VE architecture enables researchers to do the following:

- i. Construct and analyze scenarios;
- ii. Design autonomous agents with goals, behaviours and attributes using Repast™;
- iii. Use a powerful and user-friendly GIS: Google Earth™ / Maps™.

- iv. Quantify a specific measure;
- v. Obtain any spatial distribution of people or objects;
- vi. Inform variable inputs and obtain variable outputs;
- vii. Storage data output;
- viii. Estimate the impact of a critical process;
- ix. Define prompt answers;
- x. Train personnel to handle the analyzed situation;

Following this methodology, it is possible to integrate both a geo-referenced environment together with agent-based models in order to simulate a critical process present in the real world

4. Acknowledgment

We would like to thank to our families, the Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) and Universidade do Estado do Rio de Janeiro(UERJ) for their support throughout the duration our research, which we are grateful for.

5. References

- Appleton, Ben; Stucker, Lary (2007). Using PHP/MySQL with Google Maps from http://code.google.com/intl/en/apis/maps/articles/phpsqlajax_v3.html
- Argonne, National Laboratory (2011). Recursive Porus Agent Simulation Toolkit from http://repast.sourceforge.net/repast_3/index.html
- Banks Jerry, (1998). Handbook of Simulation, Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice, Emp Books.
- Benenson , Itzhak; Torrens Paul (2004). Geosimulation: Automata-Based Modeling of Urban Phenomena. Wiley.
- Burrough, P.A .; McDonnel, R. A. (1998). Principles of Geographical Information Systems, ISBN 0-19-823366-3, Oxford University Press, New York , USA.
- Crooks, Andrew T.(2007). The Repast Simulation/Modelling System for Geospatial Simulation, ISSN 1467-1298, Paper 123, Centre for Advanced Spatial Analysis University College London , London, England.
- Drogoul, A.; Ferber, J. (1994). Multi-agent Simulation as a Tool for Studying Emergent Processes in Societies. In Simulating Societies. The Computer Simulation of Social Phenomena. edited by N. Gilbert and J. Doran, 127-142. London. UCL Press.
- De Almeida Silva, Tadeu Augusto; Farias, O. L. M. (2009). A Virtual Environment for Simulation of Radiological Accidents. Conference on Nuclear Training and Education (CONTE). American Nuclear Society. Florida, USA.
- Elmasri, R.; Navathe, S. B. (1994). - Fundamentals of Database Systems, Redwood City: Benjamin. Cummings Publishing Company, Inc.
- Farias, O. L. M; Santos N. (2005). Agent-Based Geographical Information System. International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce - IAWTIC'2005, v. 1. p. 998-1005. , Edited by M. Mohammadian, Vienna.
- Gardner, M.(1971).Mathematical games: On cellular automata, self-reproduction, the Garden of Eden, and the game "life". Scientific American 224(2):112-117.
- Gimblett, H. Randy (2002). Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes. Oxford, University Press, USA.
- Google (October, 2011). Google Maps Javascript API V3 Tutorial from <http://code.google.com/intl/en/apis/maps/documentation/javascript/tutorial.html#Intro>
- Levy, S. (1992). Artificial Life. The Quest for a New Creation. Penguin.
- Lim, K. ; Deadman, P. J.; Moran, E. ; Brondízio, E. ; McCracken, S.(2002).Agent-based simulations of household decision making and land use change near Altamira, Brazil. In Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling: Techniques for Simulating Social and Ecological Processes, ed. R. Gimblett, New York: Oxford University Press, pp. 277-310.
- Longley, Paul A.; Batty, Michael (2003). Advanced Spatial Analysis: The Casa Book of GIS., ESRI Press.
- Maguire, David; BATTY, Michael; Goodchild, Michael (2005). GIS, Spatial Analysis, and Modeling. ESRI Press.
- North, Michael J.; Collier , Nicholson T.; Vos, Jerry R. (2006). Experience Creating Three Implementations of the Repast Agent Modelling Toolkit. ACM Transaction Modelling and Computer, vol. 16, no. 1.
- Oracle (2011). MySQL Enterprise Edition Trial from <http://www.mysql.com/trials/>

- Soares Filho, B. S.; Cerqueira, G. C.; (2002). DINAMICA: A new model to simulate and study landscape dynamics. *Ecological Modeling*.
- Winner, N.(1948/1961). *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and Machine*. Cambridge, MA, MIT Press.
- Wolfram, S.(2002). *A new kind of science*. Wolfram Media, Incorporated.
- Wooldridge, M.J. (2002). *An Introduction to Multiagent Systems*, John Wiley & Sons, London, England.
- Wooldridge, M. J., Jennings, N. R. (1995). Agents Theories, Architectures, and Languages: a Survey. *Proceedings of ECAI'94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages*, pp.1-22.
- Veldkamp A.; Fresco, L. O (1996). CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects. *Ecological Modeling* 85, pp.253-270.
- Verburg, P. H.; Soepboer, W.; Veldkamp, A.; Limpiada, R.; Espaldon, V.; Mastura, S. S. A. (2002). Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. In *Environmental Management*, Vol. 30, No. 3, pp. 391-405.