

Um Modelo Híbrido para a Simulação da Propagação de Incêndios Florestais Integrado ao Spring e ao Google Earth

Marlon da Silva Dias, Inessa Diniz Luerce e Marilton Sanhotene de Aguiar

Resumo—Florestas englobam uma grande biodiversidade e garantem o equilíbrio ecológico necessário. Por isso, são cada vez mais reconhecidas como um espaço de fundamental importância para a manutenção dos valores naturais e para a melhoria da qualidade de vida das populações. A dispersão de incêndio é um fenômeno que merece muita atenção. Não apenas por sua importância ambiental, econômica e social, mas também por conta de sua complexidade, dificuldade de modelagem e poder computacional exigido para a simulação. Sistemas Multiagentes exploram o comportamento de um grupo de agentes, independentes e com características distintas, evoluindo em um ambiente comum. Neste trabalho, aplica-se esta técnica de Inteligência Artificial para a simulação de incêndios florestais. É proposto um modelo híbrido desenvolvido no ambiente Netlogo e integrado ao SIG Spring, para coleta de dados, e ao Google Earth, para a visualização da simulação.

Palavras-chave—Simulação de Incêndios Florestais; Sistemas Multiagentes; Netlogo; Google Earth; Spring GIS.

I. INTRODUÇÃO

O estudo sobre o gerenciamento de recursos naturais busca formas de administrar terras, águas, animais e plantas, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida das pessoas no presente e nas gerações futuras. Essa área ganhou maior visibilidade com a noção de desenvolvimento sustentável, que é um princípio de como os governos vêem e compreendem o mundo. O gerenciamento dos recursos naturais foca especificamente no entendimento técnico-científico de recursos e ecologia e como estes podem dar suporte à vida animal [1].

Florestas têm sido cada vez mais reconhecidas como um espaço importante para a manutenção dos recursos naturais e qualidade de vida no planeta já que cobrem quase um terço da superfície terrestre. Sua existência têm grande relevância do ponto de vista ambiental, econômico e social [2].

Ambientalmente, abrigam uma enorme biodiversidade e são de grande importância para o equilíbrio ecológico. Além disso, têm um papel notório na proteção dos solos contra a erosão e na regularização dos ciclos hidrológicos.

Do ponto de vista econômico, as florestas têm relevância na produção de: celulose, papel, carvão vegetal, entre outros

Marlon da Silva Dias é aluno do Bacharelado em Ciência da Computação e Bolsista ITI-FAPERGS do Grupo de Computação Aplicada ao Meio Ambiente da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). E-mail: idluerce@inf.ufpel.edu.br

Inessa Diniz Luerce é aluna do Bacharelado em Ciência da Computação e Bolsista ITI-FAPERGS do Grupo de Computação Aplicada ao Meio Ambiente da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). E-mail: idluerce@inf.ufpel.edu.br

Marilton Sanhotene de Aguiar é professor doutor do Centro de Desenvolvimento Tecnológico e do Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal de Pelotas (CDTEC/PPGC/UFPel). E-mail: marilton@inf.ufpel.edu.br

tipos de madeira. O Brasil é o maior produtor mundial da celulose de fibra curta (*Eucalyptus*) e carvão vegetal, com uma produção total de celulose em 2010 de 14,1 milhões de toneladas [3].

Há, também, a importância social, onde a qualidade do espaço físico que as zonas florestais proporcionam é um fator de motivação para a prática de esportes e atividades de recreio e lazer, bem como um catalizador para o turismo [2].

Para se ter uma estimativa do número de focos de incêndio, segundo o relatório [4], durante o período de 1º de janeiro de 2002 a 15 de outubro de 2012, foram registrados 20.969 casos de incêndio em Portugal, totalizando 105.016 hectares de área queimada, entre povoamentos e matas. Já no Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação desenvolveu um sistema que monitora, por satélite, focos de queimadas e incêndios florestais. No período de 2006 até 2012, foram registrados 1.334.369 focos de incêndio [5], apresentados de forma mais detalhada na Tabela I.

Tabela I
COMPARAÇÃO DO TOTAL DE FOCOS ATIVOS DETECTADOS PELO SATÉLITE DE REFERÊNCIA NOS ANOS DE 2006 ATÉ 2012

Ano	Total de Focos
2006	254.205
2007	257.488
2008	123.249
2009	123.211
2010	249.291
2011	133.087
2012	193.838
Média	190.624

A dispersão de incêndios é um fenômeno que merece muita atenção, não apenas por sua importância ambiental, econômica e social, mas também por conta de sua complexidade, dificuldade de modelagem e poder computacional exigido para a simulação [6]. Pensando em tudo isso, torna-se necessário estudar e entender o processo de dispersão para tentar prever as possíveis consequências e tentar combatê-las.

Com isso, a simulação aparece como uma boa opção, visto que as observações de campo sofrem por diversos fatores, tais como: i) dificuldade de acesso por terra ou água (meios de transporte mais baratos) às regiões afetadas; ii) dificuldade de monitoramento remoto (restrições de energia ou sinal de telecomunicação); e, iii) dificuldade de cobertura (áreas frequentemente muito grandes).

as possíveis consequências e tentar combatê-las.

Com isso, a simulação aparece como uma boa opção, visto que as observações de campo sofrem por diversos fatores, tais como: i) dificuldade de acesso por terra ou água (meios de transporte mais baratos) às regiões afetadas; ii) dificuldade de monitoramento remoto (restrições de energia ou sinal de telecomunicação); e, iii) dificuldade de cobertura (áreas frequentemente muito grandes).

Há uma pequena diferença entre incêndio e queimada. O primeiro é considerado qualquer fogo de livre propagação sob a influência de clima, relevo e vegetação. Enquanto o segundo faz referência ao uso do fogo sob condições controladas [7].

A origem de um foco de incêndio, independente da causa, não obriga a considerar que o fogo irá propagar-se, pois existem vários fatores para decidirem essa evolução, tais como: relevo, vegetação do entorno, condições meteorológicas, etc. Os motivos que desencadeiam o início de um incêndio podem ser os mais diversos, sendo compreendida a sua origem em dois principais grupos: os causados pelo homem e os decorrentes de causas naturais. As causas naturais, muitas vezes, podem até servir para manutenção do equilíbrio de ecossistemas. Entretanto, grande parte dos incêndios provém da ação humana.

Ultimamente, a pesquisa de modelos computacionais para o estudo da propagação de incêndios tem crescido. Em 1992, Friedman [8] conduziu um levantamento sobre os modelos computacionais relacionados a incêndios para o *Forum for International Cooperation on Fire Research*, onde foram identificados 74 modelos. Com o passar do tempo, a prática de desenvolvimento desses tipos de modelos tornou-se mais comum, devido ao maior conjunto de dados disponível e ao aumento da capacidade de recursos computacionais.

Olenick [9] conduziu uma outra pesquisa, com a ideia de atualizar o trabalho de Friedman, para coletar informações dessa mesma categoria de modelos. Além de reunir os modelos, eles foram categorizados por parâmetros estipulados pelo grupo.

Nas Seções seguintes serão apresentados o referencial tecnológico utilizado no desenvolvimento deste trabalho (Seção II), o modelo de dispersão de incêndios proposto (Seção III) e, por fim, as considerações finais do trabalho (Seção IV).

II. O REFERENCIAL TECNOLÓGICO

Nesta Seção, são apresentadas as ferramentas tecnológicas que permitiram o desenvolvimento da proposta do modelo de propagação de incêndios.

A. Modelagem baseada em agentes

Sistemas Multiagentes (SMA) são sistemas compostos por diversos agentes, que exibem um comportamento autônomo mas, ao mesmo tempo, interagem com os outros agentes presentes no sistema. Além disso, são capazes de tomar decisões, levando em conta a satisfação dos seus objetivos, e interagir com outros agentes, utilizando protocolos de

interação inspirados nos humanos e visando algumas das seguintes funcionalidades: coordenação, cooperação, competição e negociação [11], [12].

Os sistemas multiagentes incluem agentes que interagem ou trabalham em conjunto, podendo compreender diferentes tipos de agentes interagindo em um mesmo ambiente. Cada agente é distinto e age por conta própria. O conjunto de características individuais permite que a resposta de um agente não seja necessariamente a mesma de um outro. Eles podem se mover e perceber o ambiente, assim como procurar e perceber os objetos ao seu redor, podendo interagir com eles e com os outros agentes. Para que um agente possa operar como parte do sistema, é necessária a existência de uma infra-estrutura que permita a comunicação entre os agentes que compõe o SMA.

A investigação científica e a implementação prática de sistemas multiagentes está focada na construção de padrões, princípios e modelos que permitam a criação de pequenas ou grandes sociedades de agentes semiautônomos caracterizando-se, frequentemente, como sistemas inerentemente distribuídos [13]. Atualmente, a modelagem baseada em agentes tem recebido bastante atenção, pois trata-se de uma ferramenta eficiente em lidar com sistemas de alta complexidade, além de permitir a integração de várias disciplinas em um mesmo âmbito.

Segundo [14], outras características podem motivar a larga aplicabilidade deste tipo de sistema:

- a dimensão do problema pode ser muito elevada para ser resolvida por um único agente;
- permitir a interconexão e interoperação de múltiplos sistemas legados onde, por exemplo, a manutenção do código destes sistemas já não é possível;
- providenciar uma solução natural para problemas geográfica ou funcionalmente distribuídos;
- fornecer soluções para problemas em que os peritos, os conhecimentos ou as informações necessárias para a sua resolução, se encontram distribuídos;
- permitir uma interface cooperativa homem-máquina mais natural em que ambos funcionam como agentes no sistema; e,
- oferecer uma maior clareza e simplicidade conceitual de projeto.

Os SMA oferecem potencialmente uma maior racionalização de recursos para problemas onde o conhecimento ou atividade é distribuída. Existem desta forma, várias razões adicionais para a utilização de um SMA [14], [15]. Do ponto de vista operacional, um SMA apresenta diversos benefícios, dada sua característica inerentemente distribuída:

- resolução mais rápida de problemas devido ao processamento concorrente;
- diminuição da comunicação devido ao processamento estar localizado junto à fonte de informação e a comunicação ser realizada a alto-nível;
- aumento da flexibilidade e escalabilidade resultantes da

Tabela II
COMPARAÇÃO ENTRE ALGUNS AMBIENTES DE MODELAGEM BASEADA EM AGENTES [10].

Plataformas	Ascap	Mason	Repast	NetLogo	SWARM
Quantidade de Usuários	Baixa	Crescente	Grande	Grande	Baixa
Linguagem	Java	Java	Java e Python	NetLogo	Java e Objective C
Rapidez de execução e desenvolvimento	Moderada	Mais rápido	Rápido	Moderado	Moderado
Facilidade de aprendizagem	Moderada	Moderada	Moderada	Boa	Baixa
Documentação	Boa	Pouca	Pouca	Muita	Boa

possibilidade de interconexão de múltiplos sistemas com arquiteturas distintas;

- aumento da confiabilidade devido à inexistência de um ponto singular de falha;
- aumento da capacidade de resposta devido aos sensores, sistemas de processamento e atuadores estarem localizados em conjunto, no interior dos agentes;
- facilidade de desenvolvimento de sistemas devido à modularidade resultante da decomposição dos problemas e da decomposição dos sistemas em agentes semi-autônomos.

Assim, o uso de SMA como ferramenta de simulação e apoio à tomada de decisão é bastante plausível e motiva sua aplicação na simulação da propagação de incêndios.

B. Netlogo

NetLogo é uma linguagem e ambiente multiagente utilizado principalmente para simulação de fenômenos naturais e sociais. Trata-se de uma boa ferramenta para modelagem de sistemas complexos que evoluem no tempo. Ele foi desenvolvido com o intuito de ser usado na pesquisa e no ensino; e, é aplicado em uma grande gama de disciplinas e níveis educacionais [16]. O *software* possui partes em Java e em Scala, o que permite executá-lo na maioria das plataformas. Ele é *freeware* e *open-source*, e, ainda, possui vasta documentação.

A plataforma Netlogo possibilita a troca de informações com outras aplicações; ela possui comandos que permitem escrita e leitura de arquivos de texto, que podem ser facilmente abertos e analisados por outros programas. Além disso, os modelos podem ser exportados diretamente para um *Applet* Java que pode ser executado em qualquer navegador *web*.

Com base na Tabela II, é possível notar diversas vantagens em relação aos demais ambientes de simulação, tais como: maior número de usuários, rapidez de execução e programação, facilidade de aprendizagem e documentação. Considerando estas e as demais características descritas anteriormente, observa-se que o NetLogo é uma boa alternativa para trabalhar com simulação multiagente, o que subsidia a escolha desta plataforma para o desenvolvimento do trabalho.

C. Sistemas de informações geográficas

A coleta de informações sobre a distribuição geográfica, suas propriedades, recursos minerais, animais e plantas sempre foi uma parte importante das atividades das sociedades organizadas. Antigamente, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel; isto impedia uma análise que combinasse diversos mapas e dados. Na segunda metade

do século passado, com o desenvolvimento da tecnologia de informática, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento [17].

Estes sistemas vem influenciando de maneira crescente as áreas de cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional. As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georeferenciados [17].

SIG é um sistema que processa dados gráficos e alfanuméricos, com ênfase na análise espacial e modelagens de superfície. É um sistema que integra em uma base de dados informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno. Além disso, oferece mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados e gerar mapas.

Foi escolhido o SPRING como ferramenta SIG deste trabalho, utilizado para a classificação e a importação do cenário inicial para simulação no Netlogo. O SPRING [18] foi desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) em parceria com EMBRAPA, IBM Brasil, TECGRAF (Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da PUC-Rio) e Petrobras. O sistema foi desenvolvido na linguagem C++ e é funcional para as plataformas Windows e Linux.

D. Google Earth

O *Google Earth* é um *software* que permite visualizar, por meio de um globo virtual, imagens, mapas, terrenos, e construções em 3D. É possível ter uma experiência realística de visualização da Terra, procurar locais e navegar por rotas. É permitido ao usuário criar suas próprias rotas, caminhos e animações [19]. Para que seja possível executar estas ações, é necessário utilizar arquivos KML (*Keyhole Markup Language*) para orientar as ações dentro do *software*.

O KML é um formato de arquivo usado para exibir dados geográficos e possui uma estrutura de *tags* com elementos e atributos aninhados, baseado no padrão XML (*Extensible Markup Language*) [20]. Como trata-se de uma linguagem interpretada, não são gerados arquivos intermediários, portanto, é possível utilizar um editor de texto puro (*plain-text*) para modificá-lo. Também é possível acessar parte do código através da interface do *Google Earth* e, durante a navegação do usuário, é possível fazer interações com o ambiente, as quais

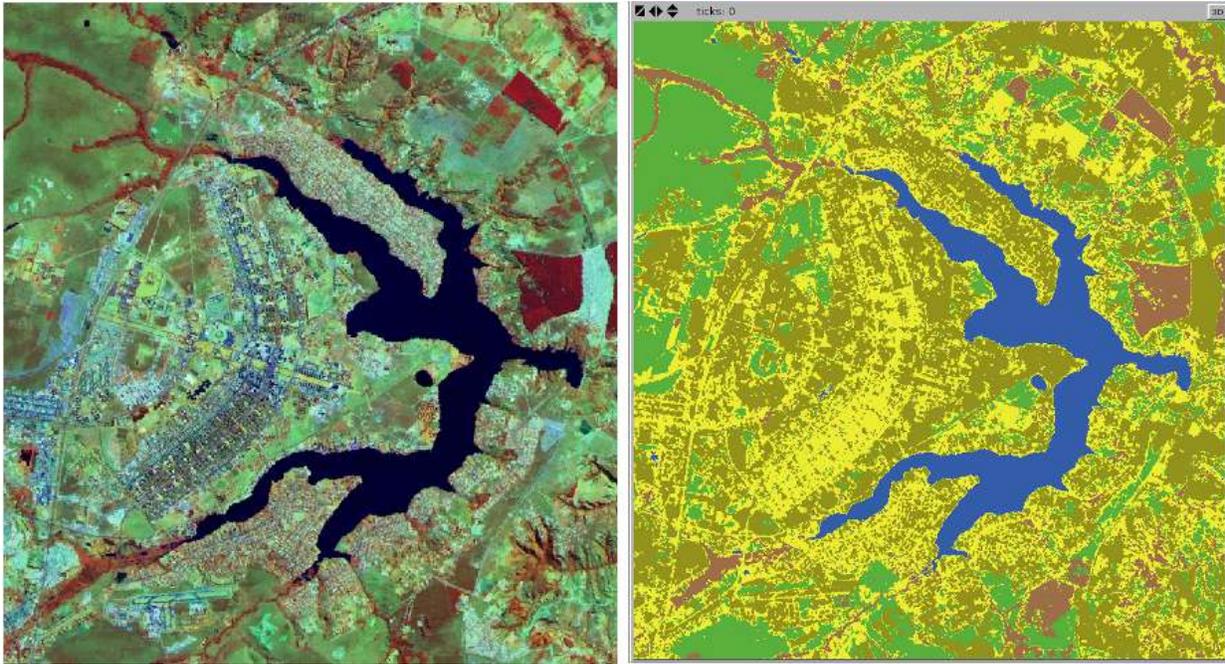


Figura 1. Imagem de satélite da área de Brasília (à esq.) e a classificação resultante do SPRING como cenário inicial no Netlogo (à dir.).

geram a codificação correspondente. Ao clicar em um objeto em sua interface, encontra-se o código que o implementa. Neste trabalho, o *Google Earth* é utilizado para a visualização remota independente dos ciclos da simulação realizada no Netlogo.

III. O MODELO PROPOSTO

Este trabalho pretende a hibridização dos modelos apresentados nos trabalhos de [21] e [22] e, ainda, a incorporação de informações de umidade, evapotranspiração e direção do vento, ausentes nos modelos referenciais, necessárias para a qualificação das análises de dispersão.

Ambos os trabalhos utilizam autômatos celulares para tratar da dispersão de incêndio. Neste trabalho, propõe-se um modelo utilizando Sistema Multiagentes e a integração de duas outras ferramentas ao modelo visando trazer a possibilidade da utilização de cenários mais reais e facilitar a visualização da simulação. A seguir serão apresentados os principais conceitos relacionados com a proposta, assim como o funcionamento geral do modelo e resultados de simulações preliminares.

A Tabela III enumera as características do modelo proposto, e, ao mesmo tempo relaciona com as utilizados como referência [22] e [21].

A. Geração do cenário inicial

O “mundo”, como é chamado todo o cenário da simulação no NetLogo, pode ser importado e exportado através de um arquivo texto no formato CSV (*Comma-Separated Variables*), onde há informação de todas as variáveis do modelo, bem como dos agentes.

O SPRING foi adotado neste trabalho com o objetivo de separar o ambiente de simulação multiagente das fases de

aquisição e pré-processamento dos dados para a simulação, permitindo que sejam utilizados dados reais para a simulação e utilizados os mecanismos oferecidos propriamente pelo SIG. Estes mecanismos permitem, por exemplo, combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados e gerar mapas alternativos.

O SPRING realiza a classificação das imagens pelo processo de extração de informação ao reconhecer padrões e objetos homogêneos [18]. Os classificadores utilizam a informação espectral isoladamente de cada pixel para achar regiões homogêneas e o resultado final do processo de classificação é uma imagem digital que constitui um mapa de *pixels* classificados.

A Figura 1 representa um cenário utilizado para simulação. No SPRING foram classificados dois tipos de área urbana conforme a densidade das construções (os quais aparecem na Figura 1 à direita, como amarelo e outra com um amarelo mais escuro), solo (marrom), vegetação (verde) e água (azul). Entretanto, cabe adiantar que no modelo desenvolvido os dois tipos de área urbana são considerados como apenas uma classe. Essas classes de agentes são informadas ao SPRING para o treinamento da classificação. O arquivo gerado no SPRING contém, além da classificação propriamente dita, a localização geográfica da imagem e a resolução da imagem.

A imagem resultante do processo de classificação do SPRING pode ser exportada em um arquivo próprio do sistema (formato SPR). Neste arquivo, cada pixel da imagem resultante, após classificação e tratamento, representa uma classe (identificada por um número). Esses números são definidos no momento do treinamento para a classificação.

Tabela III
COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO PROPOSTO E OS UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA

Características dos modelos	Modelo 1 [22]	Modelo 2 [21]	Modelo proposto
Técnica utilizada	autômatos celulares	autômatos celulares	sistemas multiagentes
Classe casa	✓	*	✓
Classe árvore	✓	*	✓
Classe solo	✓	*	✓
Classe estrada	✓	-	✓
Classe lago	✓	-	✓
Chuva	-	-	✓
Umidade	-	-	✓
Vento	-	-	✓
Combustão espontânea	-	✓	✓
Ajuste de parâmetros pelo usuário	-	**	✓
Integração com outras ferramentas	-	-	✓

*apenas define células que não estão pegando fogo, não faz distinção entre vegetação, construção ou solo

**não foi especificado detalhadamente as modificações sobre os parâmetros ou se há possibilidade de alteração pelo usuário

Neste projeto, desenvolveu-se um programa *parser* que converte o arquivo SPR em um arquivo compreensível pelo Netlogo representando a imagem classificada pelo SPRING, formando o cenário real de simulação. Na ausência de imagens de satélite, um cenário também pode ser criado de forma hipotética, através de mecanismos aleatórios, conforme parâmetros determinados pela interface do modelo.

B. Funcionamento do modelo

No modelo, foram definidos três tipos de agentes com características distintas: vegetação (identificado no modelo como *árvore*), área urbana (*casa*) ou solo exposto. Os agentes *árvore* e *casa* têm uma certa chance de pegar fogo, por outro lado, o agente *solo* pode mudar sua condição e tornar-se um agente *árvore* ou *casa*. Além dos agentes citados, há a presença dos agentes *estrada* (utilizado para a simulação de barreiras artificiais para controle do fogo) e *lago* (utilizado para representação de corpos d'água).

Cada agente possui informações próprias como os atributos de *idade*, *tipo* e *status*. O primeiro atributo define a idade do agente e é aplicável tanto às *árvores* quanto às *casas* e ao *solo*. De acordo com [21], quanto mais antiga é uma floresta, maior é o acúmulo de combustível pronto para queima contido nela.

Desta forma, a idade do agente influencia na chance de pegar fogo, pois, quanto mais velho ele for, maior será o material orgânico gerado em torno dele (no caso de *árvores*) ou mais depreciada será a tecnologia utilizada na construção (fiação ou material empregado na construção), propiciando a combustão.

Quando um agente estiver incendiando, a idade é utilizada para contar o tempo em que ele permanecerá em chamas e para agentes do tipo *solo*, também serve como um contador do tempo que ele levará para modificar seu estado. O atributo *tipo* determina se o agente é *árvore* (0), *casa* (1) ou *solo* (2). O atributo *status* representa se o agente está queimando (1) ou não (0). Tendo por base que o *solo* não pega fogo, este atributo é desconsiderado no referido tipo de agente.

A Figura 2 apresenta os parâmetros do modelo que podem ser modificados durante a simulação. Como foi citado



Figura 2. Parâmetros que podem ser ajustados no modelo.

anteriormente, há dois modos para se inicializar o cenário da simulação: i) através do botão **Preparar**; ou ii) através do botão **Importar Mundo**. O botão **Preparar** serve para inicializar a simulação com o cenário hipotético aleatório. O botão **Importar Mundo** inicializa a simulação importando um cenário gerado através do SPRING. O botão **Go** inicia o processo de simulação e executa todas as regras de evolução do modelo. O símbolo no canto inferior direito do botão **Go** indica que ele, depois de acionado, só será desativado quando o programa chegar a seu estado final. Caso esta característica esteja desativada, o programa irá realizar sua execução iteração a iteração.

Ainda, como apresentado na Figura 2, existem seis monitores que mostram, em cada *tick* (ciclo) as quantidades de: células pegando fogo; agentes *casa*, *árvore* e *solo*; bem como, a idade média dos agentes *casa* e *árvore*. Por fim, há nove *sliders* (barras deslizantes) representando cada variável do modelo. A saber, as variáveis utilizadas pelo modelo são:

- 1) *taxa-casa* que indica a proporção de casas que serão criadas na geração do ambiente hipotético;
- 2) *taxa-arvore* que indica a proporção de árvores que serão

- criadas na geração do ambiente hipotético;
- 3) *probabilidade-combustao* que denota a possibilidade de ocorrer combustão nos agentes casa e árvore;
 - 4) *chance-combustao* indica a probabilidade de ocorrer combustão espontânea;
 - 5) *LQ-arvore* que denota o tempo (em número de ciclos) de queima de uma árvore;
 - 6) *LQ-casa* que indica o tempo de queima de uma casa;
 - 7) *LR-arvore* que denota a idade máxima de uma árvore;
 - 8) *LR-casa* indicando a idade máxima de uma casa;
 - 9) *LS* indica o tempo para um solo mudar de tipo.



Figura 3. Parâmetros relacionados à chuva e ao vento.

A evolução do modelo é determinada pelos seguintes comportamentos definidos internamente como regras. Uma árvore ou uma casa possui uma certa chance de pegar fogo. Essa chance é determinada por três fatores: i) a idade do agente, quando mais velho ele for, maior a chance dele pegar fogo; ii) a quantidade de vizinhos com fogo; e, iii) o tempo em que os vizinhos estão pegando fogo.

Um agente *solo* permanece como *solo* por um dado tempo, definido por *LS*. Este tipo de agente, pode também virar *árvore* ou *casa*. Se houver mais árvores que casas ao redor do agente *solo*, ele torna-se *árvore*; se houver mais casas, torna-se *casa*. Em caso de empate nas quantidades, o novo tipo será decidido mediante sorteio.

De forma geral, *LS* define o tempo em que o agente *solo* levará para mudar, porém não é levado em conta se há presença de fogo ao redor. Naturalmente, não haverá construção de casas ou desenvolvimento de florestas enquanto o fogo se alastra, apenas em situações hipotéticas. Em situações reais, um valor deve ser definido apropriadamente para *LS*.

Um agente que está pegando fogo, permanece pegando fogo por um tempo de acordo com o *LQ*, estabelecido pelo modelo. Assim que atingir este o tempo limite, o agente passa a ser *solo*. Além disso, em cada iteração do modelo há a chance de um determinado agente entrar em combustão espontaneamente.

No modelo, os agentes dos tipos *estrada* e *lago* são estáticos, servindo como barreira de dispersão do fogo. Em qualquer momento da simulação os botões e *sliders* permitem o usuário interferir nos parâmetros do modelo, em tempo de execução, gerando diferentes comportamentos dos agentes na mesma simulação.

Além das características já citadas, o modelo ainda consta com dois fatores naturais: chuva e vento. Esses fatores possuem seus parâmetros também ajustáveis, como mostrado na Figura 3.

A cada ciclo de execução há a possibilidade de chover, representado pelo *slider chance-chuva*. Quando chove, um agente é selecionado, de forma aleatória, e, a partir dele a chuva se espalha. A quantidade de chuva que cai em cada agente é variável, aleatório entre zero e o valor em *limite-de-chuva*. Essa quantidade de chuva que caiu em um agente representará a umidade presente nele, somada com a umidade anterior.

A cada ciclo da simulação, a umidade do agente diminui em um certo valor, determinado pelo valor de *evapotranspiracao*. Caso chova em um agente que está pegando fogo, o fogo será apagado e o agente tornar-se-á *solo* se a umidade desse agente for igual ou superior a representada em *chuva-apagar-fogo*. Por fim, esse agente não pegará fogo caso a umidade do agente seja igual ou superior a representada em *bloqueio-fogo*.

O vento faz com que o fogo se propague em alguma direção. O fogo vindo de um agente da direção do vento é intensificado pelo valor presente em *fator-vento*. O fator do vento pode ser ativado e desativado no modelo. Caso estiver ativado, pode-se manter o vento em uma direção fixa (representado por *direcao-vento*), ou, ainda, permitir que tome direções aleatória em cada iteração.

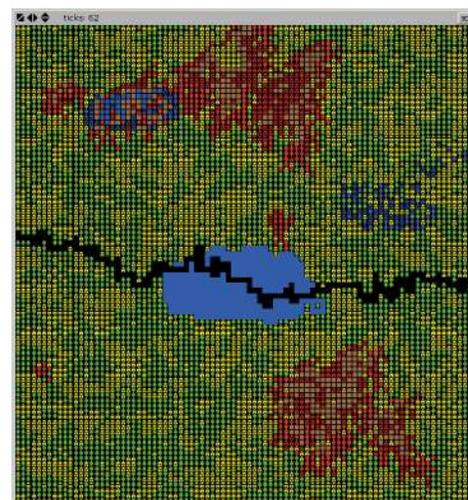


Figura 4. Uma representação gráfica do modelo sendo executado sobre um cenário hipotético.

A Figura 4 mostra um ciclo de execução do modelo, onde pode-se ver agentes sendo afetados pela chuva (agentes azuis escuros) e focos de incêndio (agentes vermelhos).

C. Visualização da simulação

O Netlogo permite exportar os dados referentes a cada ciclo da simulação. Todas as informações sobre os agentes, suas posições e estados estão disponíveis e podem ser armazenadas em um arquivo CSV. Com base nisso, foi desenvolvido um outro programa *parser* para converter os dados gerados pelo Netlogo em um arquivo KML para possibilitar a visualização no *Google Earth*.



Figura 5. Sobreposição dos dados oriundos do simulador e sua correspondente visualização no *Google Earth*.

Neste arquivo são transcritos os atributos de latitude e longitude, que tornam possível localizar geograficamente o cenário no qual se passa a simulação. Também foram transcritas algumas características dos agentes (dentre elas: posição, cor, tipo, etc) as quais referenciam seu comportamento naquele determinado instante. Na Figura 5 é apresentado um exemplo da visualização no *Google Earth* da mesma região exposta na Figura 1.

A cada ciclo da simulação, o **mund**o do Netlogo é convertido e salvo em KML. Com isso, todos os passos da simulação podem ser visualizados remotamente (ou mesmo localmente) no *Google Earth*, sem necessitar do Netlogo. Estes arquivos KML são armazenados em um servidor WEB e, por meio de um *script*, são encadeados na ordem apropriada da simulação. Desta forma, tem-se a impressão da execução do modelo pelo *Google Earth*.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de Inteligência Artificial são amplamente utilizadas para resolver problemas relacionados com o gerenciamento de recursos naturais. Normalmente são realizadas abstrações e simplificações no modelo computacional, comparativamente ao modelo real.

Esta é uma pesquisa exploratória da modelagem da propagação de incêndios com o uso de sistemas multiagentes onde se busca entender o comportamento de incêndios no meio-ambiente. Além de usá-lo para a compreensão é possível utilizá-lo em cenários reais, estando o modelo integrado à informações coletadas em um SIG (SPRING) e visualizar a simulação no *Google Earth*. Ainda, incorporaram-se informações de umidade, evapotranspiração e direção do vento, ausentes nos modelos referenciais, necessárias para a qualificação das análises de dispersão.

Como os modelos ambientais são fortemente conectados, muitas vezes aspectos fundamentais dos mesmos são perdidos, e a análise dos dados prejudicada. Por isso, este trabalho tem o intuito de integrar um ferramental consolidado mas utilizado isoladamente no contexto de aplicações no gerenciamento de recursos naturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS (PRONEX, processo nr. 10/0049-7) pelo auxílio em forma de bolsa.

REFERÊNCIAS

- [1] B. A. Holzman, *Natural Resource Management*. San Francisco: San Francisco State University, 2009.
- [2] M. d. G. c. d. A. Oliveira, "Propagação do fogo e dinâmicas florestais," Master's thesis, Faculdade de Engenharia, 2005.
- [3] ABRAF, *Anuário estatístico da ABRAF 2011 ano base 2010*. Brasília: ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, 2011.
- [4] ICNF, *Relatório Provisório de Incêndios Florestais – fases alfa, bravo, charlie e delta – 01 de Janeiro a 15 de Outubro*. Portugal: Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, 2012.
- [5] INPE, "Monitoramento de Queimadas e Incêndios," <http://www.inpe.br/queimadas/estatisticas.php>, 2013.
- [6] A. Dunn and G. Milne, "Modelling wildfire dynamics via interacting automata," *Cellular Automata*, pp. 395–404, 2004.
- [7] A. N. C. Rodrigues, *Considerações sobre prevenção e combate aos incêndios florestais no Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: UFRRJ – Instituto de Florestas, 2007.
- [8] R. Friedman, "An international survey of computer models for fire and smoke," *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 81–92, 1992.
- [9] S. M. Olenick and D. J. Carpenter, "An updated international survey of computer models for fire and smoke," *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 13, pp. 87–110, 2003.
- [10] P. Sapkota, "Modeling diffusion using an agent-based approach," Ph.D. dissertation, University of Toledo, 2010.
- [11] G. N. Gilbert and K. G. Troitzsch, *Simulation for the Social Scientist*. Buckingham: Open University Press, 1999.
- [12] S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 2nd ed. Pearson Education, 2003.
- [13] V. Lesser, "Cooperative Multiagent Systems: A Personal View of the State of the Art," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 11, no. 1, January 1999.
- [14] L. P. Reis, "Coordenação em sistemas multi-agente: Aplicações na gestão universitária e futebol robótico," Ph.D. dissertation, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [15] P. Stone and M. Veloso, "Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective," *Autonomous Robots*, vol. 8, pp. 345–383, 1997.
- [16] S. Tisue and U. Wilensky, "Netlogo: A simple environment for modeling complexity," in *International Conference on Complex Systems*, Boston, 2004.
- [17] G. Câmara, C. Davis, and A. Monteiro, *Introdução à ciência da geoinformação*. São José dos Campos: INPE, 2001.
- [18] G. Câmara, R. C. M. Souza, and J. G. U. M. Freitas, "Spring: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling," *Computers & Graphics*, vol. 20, no. 3, pp. 395–403, May 1996, iSSN 0097-8493.

- [19] Google, “Google Earth,” <http://support.google.com/earth/bin/answer.py?hl=pt-BR&topic=2376010&hlrm=en&ctx=topic&answer=176145>, 2012.
- [20] G. Developers, “Keyhole Markup Language,” <https://developers.google.com/kml/>, 2012.
- [21] V. H. P. Louzada and W. C. F. Junior, “Incêndios florestais em autômatos celulares, simples e grandes queimadas,” *Biomatemática*, vol. 18, no. 1, pp. 15–26, 2008.
- [22] K. S. Salles, U. F. Oliveira, and M. S. Aguiar, “Uma extensão do modelo de chopard para propagação de incêndio ambiental baseado em autômatos celulares com alto desempenho,” in *IV SulComp 2008 - Congresso Sul Brasileiro de Computação*, UNESC. Criciúma / SC: Editora da UNESC, 2008, pp. 1–7.