

Ferramenta de Simulação com Abordagem de Sistema Multiagente Híbrida para Gestão Ambiental

Carolina Gonçalves Abreu^{1,2}, Cássio Giorgio Couto Coelho²,
Célia Ghedini Ralha², Alexandre Zaghetto², Bruno Macchiavello²

¹Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA)
SCEN Trecho 2 - Ed. Sede - Cx. Postal nº 09566 - CEP 70818-900 - Brasília-DF

`carolina.abreu@ibama.gov.br`

²Departamento de Ciência da Computação – Universidade de Brasília (UnB)
Caixa Postal 4466 – 70.904-970 – Brasília – DF – Brasil

`{cassiocouto,ghedini,alexandre,bruno}@cic.unb.br`

Abstract. *This paper presents a prototype computer system to perform land use simulations. The system aims to assist in analyzing the dynamics of land use and cover, in such a way, that can serve as a tool in decision making. The system uses a multi-agent approach and a model user configurable. The model takes into account certain proximal variables, such as the presence of roads, buildings, water courses, among others. These proximal variables are used to identify regions most likely to be used in any anthropic activity. The system allows user to configure the simulation model indicating which proximal variables are used, the importance of each variable, and the state machine to be used during the simulations. The use of multi-agent system approach allows the definition of different behavior for agents, which can generate diverse simulation scenarios. As experimental results, this paper presents initial simulations using the cerrado biome, which is recognized as one of the major biomes in Brazil, and is also considered a hotspot of global biodiversity.*

Resumo. *Este artigo apresenta um protótipo de sistema computacional que possibilita a realização de simulações do uso do solo. O sistema tem como objetivo auxiliar na análise da dinâmica do uso e cobertura do solo, de tal forma que possa servir como uma ferramenta utilizada na tomada de decisões. O sistema utiliza uma abordagem multiagente e modelo configurável pelo usuário. O modelo leva em consideração certas variáveis proximais, como por exemplo, a presença de estradas, edificações, cursos de água, entre outros. Estas variáveis proximais são utilizadas para identificar as regiões com maior probabilidade de uso antrópico. O sistema permite configurar o modelo de simulação indicando quais variáveis proximais serão utilizadas, a importância de cada uma delas, e a máquina de estados a ser utilizada. O uso da abordagem de sistema multiagente permite a definição de diversos comportamentos para os agentes envolvidos podendo gerar diferentes cenários de simulação. Como resultados experimentais, este trabalho apresenta simulações iniciais para o bioma do cerrado; o qual é reconhecido como um dos maiores biomas brasileiros, além de ser considerado um hotspot da biodiversidade mundial.*

1. Introdução

Têm-se observado que os sistemas de tomada de decisão tendem a separar os fatores ambientais do plano político e de planejamento, não incluindo-os de maneira significativa, seja na formulação de políticas públicas, seja na resolução de questões cruciais de gestão ambiental. Dessa maneira, uma miríade de informações ambientais que são produzidas por atores técnicos não têm o seu potencial explorado para embasar a tomada de decisão. Um exemplo claro desse distanciamento entre a informação e a ação é o Bioma Cerrado.

Segundo Sano *et al.* [2010], o Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, ocupando 204,7 milhões de hectares na porção central do Brasil, cerca de 21% do território nacional, com uma das mais ricas savanas do mundo e sendo o segundo bioma brasileiro mais rico em biodiversidade. O Cerrado caracteriza-se como uma formação do tipo savana tropical, com destacada sazonalidade climática e acentuada dinâmica de ocupação humana.

O Cerrado é considerado um *hotspot*¹ da biodiversidade mundial, requerendo ações urgentes para a conservação da riqueza biológica frente às ameaças de destruição. Entretanto, historicamente são altíssimas as taxas de desmatamento nesse bioma, muito superiores, inclusive, às taxas de desmatamento na Floresta Amazônica. Os dados do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), mostram uma perda acumulada de 47,8% de cobertura vegetal natural do Cerrado até 2008. Especialistas apontam que existe um esforço de conservação muito inferior às reais necessidades do bioma. Somente 2,2% do território ocupado pelo Cerrado é legalmente protegido [Klink e Machado, 2005].

Segundo Sano *et al.* [2008], essas alterações advêm principalmente da substituição da vegetação natural do Cerrado por áreas destinadas principalmente às atividades agropecuárias, uma vez que o Cerrado é considerado uma das últimas fronteiras de produção agrícola do mundo. As principais atividades desenvolvidas na região concentram-se no plantio de soja, de eucalipto, de pastagens plantadas, do corte de espécies lenhosas nativas para produção de carvão vegetal, e em regiões específicas, a alta taxa de urbanização.

As mudanças no uso e cobertura do solo são relevantes não somente para o Bioma Cerrado, pois são consideradas uma das principais fontes de alteração recente na superfície terrestre. A intensidade e rapidez do processo de devastação do Cerrado requerem ações urgentes e fizeram com que Klink e Machado [2005] apontassem como principal desafio: a conciliação entre o uso da terra e a conservação desse bioma. Portanto, o entendimento da dinâmica desses fenômenos é condição precípua para uma adequada política de uso sustentável dos recursos.

Um dos instrumentos que podem ser aplicados para entender essa dinâmica são os modelos abstratos. Segundo Turner *et al.* [2001], um modelo é uma representação abstrata de um sistema ou processo, que possibilita definir problemas, analisar dados ou comunicar resultados. Os modelos abstratos podem ser classificados em modelos analíticos (ou matemáticos) e modelos de simulação. Os modelos analíticos baseiam-se no emprego do instrumental matemático para apresentar de maneira exata, ou muito aproximada, como se

¹Conceito apresentado por Myers *et al.* [2000] para designar regiões que concentram altos níveis de biodiversidade e onde as ações de conservação precisam ser mais urgentes. A classificação considera o número de espécies endêmicas por área e o grau de perda do hábitat.

comporta o sistema analisado. São, portanto, utilizados em problemas em que há clareza nas variáveis e as regras podem ser facilmente formalizadas.

Já os modelos de simulação apoiam-se no instrumental computacional para gerar procedimentos ou algoritmos que vão mostrar numa escala de tempo como se comporta o sistema. Segundo Taha [2006], os modelos de simulação são geralmente utilizados para analisar dois tipos diferentes de problemas científicos: (i) problemas teóricos relacionados à problemas complexos em áreas como matemática, física, química ou estatística; e (ii) problemas relacionados à reprodução detalhada do comportamento de sistemas reais.

Verburg [2006] declara que as simulações são vistas como instrumentos de aquisição do conhecimento e de apoio à decisão. Na área da Ciência da Computação, a subárea da Inteligência Artificial (IA), com ênfase na abordagem de Sistemas Multiagentes (SMA) surge como técnica candidata à resolução de problemas de modelos de simulação dinâmicos [Wooldridge, 2009].

Pela tentativa de reproduzir os mecanismos da realidade, os modelos de simulação podem mostrar como as escolhas de como o solo é usado afetam as direções futuras do sistema retratado. Tais necessidades envolvem o entendimento da conectividade entre os elementos do ecossistema e suas interações e níveis de organização nas diferentes escalas, uma atividade complexa e dinâmica, o que justifica o interesse pelo uso de SMA para os modelos de simulação [Barreteau *et al.*, 2007].

A abordagem de SMA lida com a autonomia dos agentes, ou seja, com a capacidade que um agente deve ter de exercer controle sobre suas próprias ações. Essa característica justifica o uso desse tipo de tecnologia na representatividade para fins de organização de sistemas constituídos por interações entre diversos agentes de forma complexa e racional. A relação entre os processos biofísicos e socioeconômicos pode ser representada pela dinâmica entre agentes heterogêneos que interagem entre si e com o ambiente [Weiss, 2000].

Segundo Bousquet e Le Page [2004], a abordagem de SMA vêm sendo utilizada para apoiar tanto a discussão de conceitos como o entendimento das relações entre as ciências ambientais e sociais. Para Verburg *et al.* [2004], os estudos nessa área têm se distanciado das propostas iniciais de detecção e identificação das mudanças no uso e cobertura do solo, para a modelagem de sistemas com predição de mudanças na dinâmica, e para a exploração de cenários alternativos na gestão e planejamento.

Apesar das vantagens de modularidade e abstração, chaves para se lidar com a complexidade inerente dos cenários naturais, a abordagem de SMA possui limitações e difíceis desafios. Primeiramente, há a complexidade na formulação, descrição e alocação do problema entre os agentes, bem como da síntese dos resultados da ação do SMA. Há que se estabelecer mecanismos de consenso e coordenação dinâmica das atividades entre agentes que muitas vezes apresentam objetivos distintos, além de desconhecidos do resto do grupo de agentes. Tipicamente, as decisões são tomadas com base em informações locais, não sendo possível antever o efeito do conjunto de decisões no comportamento global do sistema. Mesmo assim, é necessário estabelecer mecanismos que tentem garantir que os agentes vão agir de maneira coerente na tomada de decisão. Mais ainda, é impossível antever como circunstâncias não previstas vão impactar na ação de um agente, ou como mensurar objetivamente parâmetros de utilidade do sistema. Além dessas questões

associadas ao projeto, são intensas as demandas por recursos computacionais em SMA aplicados em contextos ambientais. Alguns desses desafios serão explicitados quando da descrição arquitetural do protótipo, enquanto outras restrições serão endereçadas na discussão de Trabalhos Futuros.

A partir desse contexto, o problema é entender a dinâmica do uso e cobertura do solo no Cerrado para contribuir na investigação de cenários mais favoráveis para a manutenção da cobertura vegetal natural, visando o equilíbrio entre políticas de conservação e o avanço das atividades de uso do solo para exploração econômica. O presente trabalho é uma evolução de uma pesquisa anterior [Marinelli *et al.*, 2010]. Este trabalho visa o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de simulação, baseada na abordagem de SMA, para analisar a dinâmica de uso e cobertura do solo, utilizando como estudo de caso o Bioma Cerrado, cuja proposta inicial foi apresentada por Abreu *et al.* [2011].

O artigo está estruturado da seguinte forma: na Seção 2 apresentamos as características gerais de ferramentas utilizadas para a produção de modelos de simulação; na Seção 3 descrevemos alguns trabalhos correlatos; na Seção 4 detalhamos o modelo de uso do solo do Cerrado, utilizado como estudo de caso nessa pesquisa; na Seção 5 apresentamos o protótipo de sistema computacional desenvolvido, incluindo suas principais características; na Seção 6 discutimos os resultados experimentais alcançados com as simulações iniciais utilizando o Bioma Cerrado; na Seção 7 concluímos sugerindo os trabalhos futuros.

2. Comparação entre Ferramentas

Existem várias ferramentas descritas na literatura que empregam perspectivas e técnicas distintas para abordar o problema da simulação dinâmica das mudanças no uso do solo. Foram comparadas as tecnologias e funcionalidades de algumas dessas ferramentas, além da complexidade dos modelos, utilizando o *framework* descrito em trabalhos anteriores, onde são analisados parâmetros de complexidade de espaço, tempo e tomada de decisão humana [Agarwal *et al.*, 2001]. Algumas ferramentas foram selecionadas para exemplificar a variedade de soluções existentes, com suas características apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características das ferramentas

Características	Dinamina-EGO	IDRISI (LCM)	CORMAS	CLUE
Tipo de Modelo	Modelos espaciais dinâmicos	Modelo espacial de Markov	Simulações Multiagentes	Modelo de estado discreto finito
Tecnologia	Autômato Celular	Autômato Celular	Sistema Multiagente	Matrizes de conversão
Hierarquia	<i>top-down</i>	<i>top-down</i>	<i>bottom-up</i>	<i>top-down</i>
Complexidade Espacial	Representação e interação	Representação	Representação e interação	Representação e interação
Escala	Raster	Raster	Raster	Raster
Resolução	Matriz Quadrada	Definida pelo usuário	Definida pelo usuário	Definida pelo usuário
Tomada de Decisão Humana	Assumida como relacionada ao tamanho da população, densidade, etc.	Nenhuma, só variáveis biofísicas no modelo	Variável conforme o comportamento dos agentes	Função de probabilidade que depende de variáveis socioeconômicas

A Figura 1 (a) apresenta a ferramenta de domínio público Dinamica-EGO, desenvolvida na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) [Soares-Filho *et al.*, 2002]. O

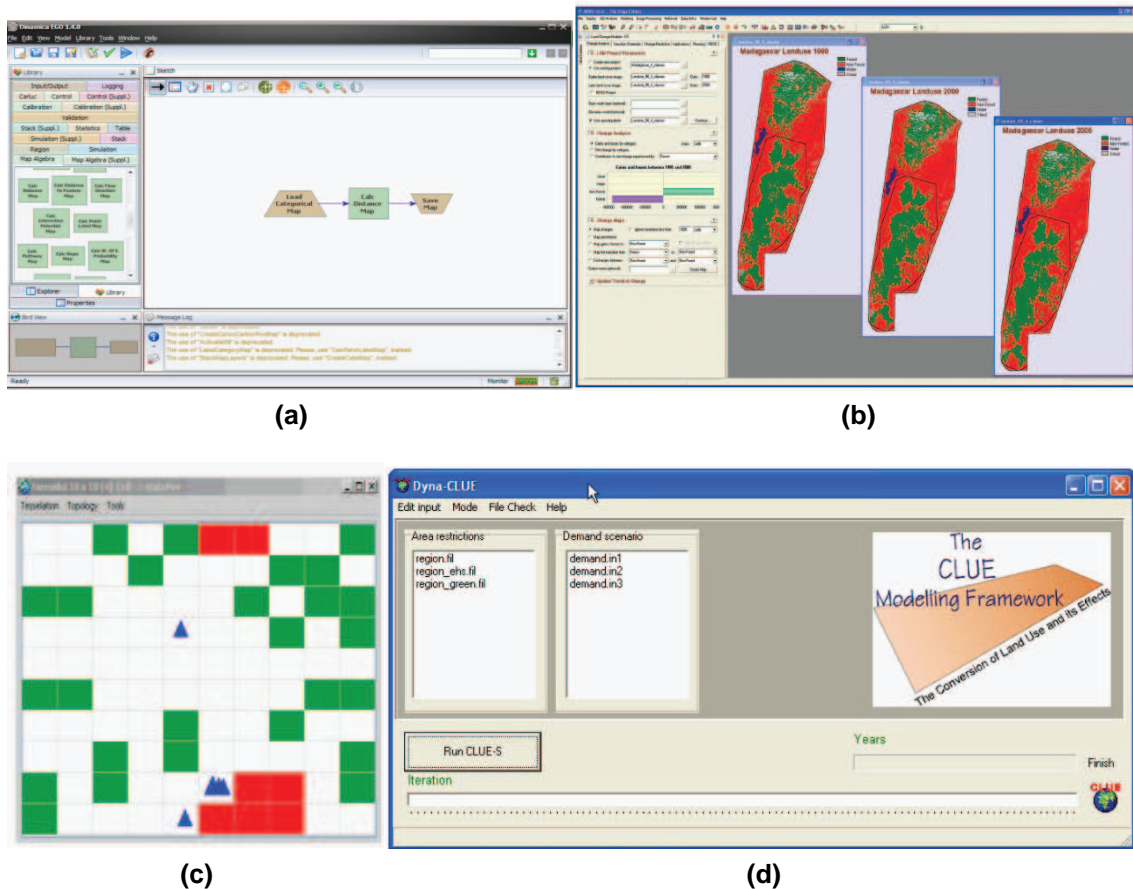


Figura 1: Interfaces das ferramentas de simulação: (a) Dinamica-EGO, (b) IDRISI, (c) CORMAS e (d) CLUE.

Dinamica-EGO é um simulador que utiliza um modelo baseado em cálculo estocástico e formalismo de autômato celular, para replicação dos padrões espaciais de mudanças da dinâmica de paisagens. O Dinâmica-EGO possibilita a concepção e a aplicação de modelos de simulação para a gestão ambiental sem fazer uso de técnicas de IA ou SMA.

A Figura 1 (b) ilustra a ferramenta IDRISI, a qual utiliza modelo de simulação espacial baseado em autômato celular e cálculo estocástico. Estes modelos têm se tornado populares, sendo incluídos em softwares comerciais de Sistemas de Informações Geográficas, como o IDRISI, devido à sua facilidade de implementação, habilidade em mimetizar formas e capacidade de serem readaptados para produzir vários tipos de fenômenos espaciais [Eastman, 2001]. Existe um módulo projetado para as mudanças no uso do solo no IDRISI denominado *Land Change Modeler* (LCM), o qual não utiliza técnicas de IA ou a abordagem de SMA, mas aplica técnicas estatísticas para avaliar a mudança no espaço, tendo por base a imagem em dois tempos distintos.

O *Common-Pool Resources and Multi-agent Systems* (CORMAS), desenvolvido pela *French Agricultural Research Centre for International Development* (CIRAD), é uma ferramenta de simulação que utiliza abordagem SMA, construída na plataforma *Visual Works*, com a linguagem *Smaltalk*. Conforme apresentado na Figura 1 (c), o CORMAS foi projetada para ser um ambiente de fácil utilização, dedicado à modelagem das interações

das sociedades humanas com os recursos renováveis [Bousquet *et al.*, 1998]. Diferente de nossa abordagem de SMA, o CORMAS não faz uso da potencialidade dos agentes racionais.

A Figura 1 (d) apresenta o *framework* de modelagem *The Conversion of Land Use and its Effects* (CLUE). Segundo Verburg *et al.* [2002], o CLUE é uma plataforma específica para as investigações de uso e cobertura do solo, que utiliza um modelo discreto cujas funções de mudança são baseadas em cálculos estatísticos; no entanto possui uma limitação espacial, sendo mais adequado para aplicação em pequenas regiões. O CLUE também não utiliza técnicas de IA ou SMA.

Algumas críticas em relação às ferramentas estão descritas em vários artigos da literatura relacionada [Agarwal *et al.*, 2001; Verburg *et al.*, 2004]. Um ponto presente em quase todos os trabalhos é a questão da definição e uso das escalas, as quais não são parametrizáveis e não permitem o uso de várias escalas em um mesmo ambiente de simulação. Confirmamos esta crítica através das ferramentas pesquisadas, pois as mesmas não permitem análises em múltiplas escalas de forma simultânea.

Outra crítica encontrada na literatura diz respeito ao modo como as ferramentas tratam o espaço, pois as mesmas consideram o espaço de forma homogênea, aplicam regras de transição universais e permitem unicamente vizinhanças estacionárias. Especificamente para as ferramentas que utilizam a abordagem de SMA, as críticas residem, principalmente, no que tange a racionalidade dos agentes pois os trabalhos que apresentam essa racionalidade não costumam incluir autonomia nem proatividade em seus agentes. Alguns apontamentos de ordem mais geral observam que é necessário conferir maior credibilidade aos modelos, por meio de verificações e validações consistentes. As características técnicas de cada uma das ferramentas, bem como as críticas foram consideradas no projeto da ferramenta de simulação apresentada neste artigo.

3. Trabalhos Correlatos

São várias as aplicações de ferramentas de simulação em áreas da temática ambiental. Os exemplos variam desde a aplicação de simulações para o manejo de bacias, dispersão de fogo pelo Cerrado, áreas para conservação, gerenciamento de recursos renováveis, trocas econômicas relacionadas aos serviços ambientais, até modelos de sequestro de carbono e mudanças do clima. Nessa seção destacam-se alguns trabalhos relevantes para o entendimento da dinâmica de uso do solo, tema central para as simulações realizadas com a ferramenta desenvolvida neste projeto de pesquisa.

O modelo de Bonnefoy *et al.* [2000] foi desenvolvido na plataforma CORMAS e tem foco na ação de agentes exploradores de florestas, e em suas estratégias frente ao espaço e as relações sociais. Os autores exploram esse cenário de forma relativamente simples, de modo a demonstrarem que um SMA possui a capacidade de modelar uma região em toda a sua complexidade. O exemplo é desenvolvido para mostrar que essa ferramenta é capaz de espacializar e distribuir o comportamento de indivíduos, além de permitir que indivíduos integrem diferentes percepções do espaço, bem como diferentes restrições impostas a eles por uma comunidade. São estabelecidas as relações entre espaço, indivíduo e sociedade, de maneira a possibilitar o teste de teorias e hipóteses geográficas.

O modelo da dinâmica de uso do solo dos Pampas retrata as interações que afetam

essa fitofisionomia vegetal, em área restrita na Argentina e Uruguai. Proposto por Arbetche *et al.* [2008], esse modelo ilustra as interações entre o uso da terra para agricultura (soja) e pecuária, assim como o aluguel e compra de terrenos. O objetivo é formalizar o conhecimento sobre esses aspectos para compreender a relação entre os produtores tradicionais e o desenvolvimento nesta área. O mais interessante neste modelo é a possibilidade de tentar captar interações sociais sutis, como as tradições. Apesar da exploração do solo para o plantio de soja ser mais rentável, há uma propensão histórica (tradicional) para a pecuária. O trabalho associa uso do solo, mercado e cultura, utilizando-se de SMA para modelagem com uso da ferramenta CORMAS.

O trabalho de Saqalli *et al.* [2010] descreve o processo de desenvolvimento em ambientes rurais e com restrições econômicas e sociais. São cenários típicos de situações complexas, onde a sociedade e o ambiente estão interligados. O trabalho merece destaque uma vez que admite e trabalha com a incerteza/falta de informação. Muitas vezes, as áreas em estudo não contêm a quantidade necessária de dados e informações confiáveis que seriam desejadas. Os autores propõem um modelo baseado em agentes para abordar questões econômicas e de produção, conforme regras e normas sociais. O objetivo é construir um modelo robusto que compense a falta de informação. O comportamento dos agentes sociais foi definido a partir de entrevistas, enquanto a descrição econômica e ambiental provém da literatura. Os resultados confirmam que é possível construir agentes que levem em consideração tanto as nuances sociais, ambientais e econômicas, sendo sensíveis a essas alterações.

Outro trabalho importante, desenvolvido por Maeda *et al.* [2010], tem como foco as mudanças no uso e na cobertura do solo das Montanhas Taita, no Quênia, que também são consideradas como uma das mais importantes regiões para a conservação biológica em todo o mundo (*hotspot* de biodiversidade). Apenas 1% da cobertura original está preservada e instrumentos para auxiliar a tomada de decisão são imprescindíveis. De modo a criar políticas efetivas para a preservação dos recursos e da biodiversidade, é crucial entender as relações envolvidas na alteração da paisagem nas áreas mais degradadas. Essas são as premissas do modelo desenvolvido, que objetiva entender o papel dos atributos da paisagem e componentes de infraestrutura como forças motrizes da expansão da agricultura em Taita. A proposta não utiliza-se de SMA, mas da conjugação de informações geoespaciais e sociais, utilizando-se da ferramenta Dinamica-EGO para antever a expansão da agricultura e simular cenários futuros para a paisagem.

O grupo de pesquisa em Sistemas Computacionais para Gestão Ambiental da Universidade de Brasília (UnB)², explorou o uso de SMA para apoio à decisão. Um modelo de simulação denominado *ReasonBalance*, baseado no CORMAS utilizou SMA para avaliar o comportamento de agentes exploradores de acordo com o plano de manejo na Região de Desenvolvimento Sustentável (RDS) do Uacarí, Amazônia. As simulações visavam o entendimento das alterações no uso do solo a partir do comportamento de agricultores que agiam conforme os cenários degradativo ou conservativo [Marinelli *et al.*, 2010].

²Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil, CNPq, Grupo de Pesquisa em Sistemas Computacionais para Tratamento de Informação e Conhecimento, Linha de Pesquisa - Sistemas Computacionais para Gestão Ambiental, <http://dgp.cnpq.br/buscaoperacional/detalhelinha.jsp?grupo=024010360AHR2C&seqlinha=4>

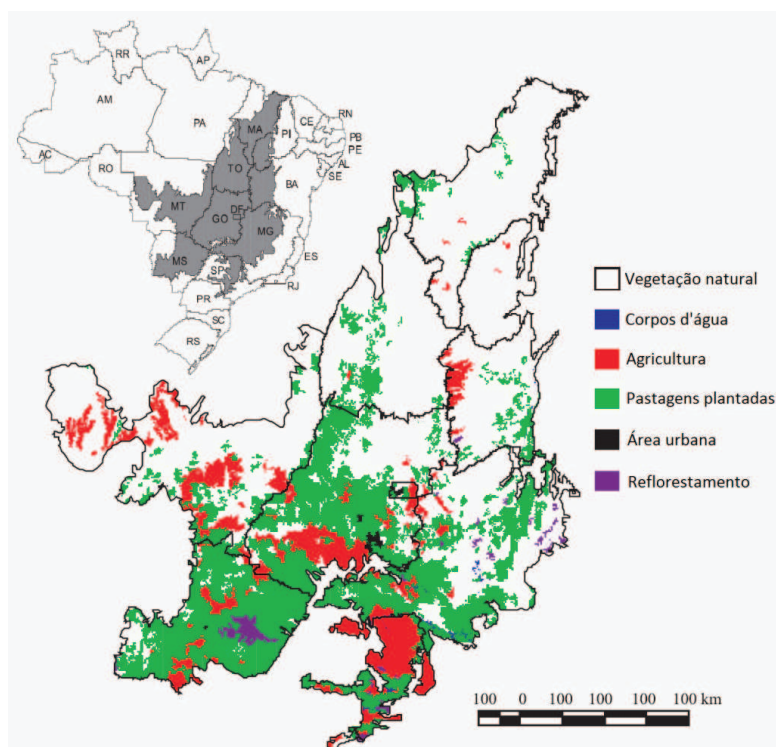


Figura 2: Visão geral do Cerrado e distribuição espacial das classes de uso da terra no Bioma Cerrado, ano de 2002 [Sano et al., 2008].

Como evolução dos trabalhos do grupo de pesquisa citado, surgiu a proposta de uma ferramenta que não apresentasse as restrições da plataforma CORMAS, utilizada anteriormente no modelo do *ReasonBalance*, claramente fazendo proveito da experiência adquirida no estudo e mapeamento de ferramentas semelhantes. Como resultado deste trabalho, passaremos a descrever o modelo definido, e a arquitetura proposta para o protótipo de ferramenta de simulação baseado na abordagem de SMA para Gestão Ambiental.

4. Apresentação do Modelo

O modelo conceitual aborda as questões de mudança do uso do solo no Cerrado, por meio de agentes de uso do solo (representativos das mudanças sócio-econômicas) e agentes espaciais (representativos das mudanças no ambiente físico). Especialistas do Ibama e UnB foram entrevistados de modo que os comportamentos dos agentes exploradores (transformadores do uso do solo) fossem descritos. O ambiente físico é descrito por uma série de imagens de satélite classificadas, associadas ao mapeamento de variáveis de interesse. Para a implementação do modelo conceitual foi adotada a abordagem SMA, cujo desenvolvimento é descrito na seção Protótipo.

A área definida para o modelo foi o Distrito Federal, unidade federativa que tem 100% do seu território em região de Cerrado, conforme ilustrado na Figura 2. Com área de 5.789,16 Km², estima-se que 68,11% da vegetação nativa já foi desmatada. Foram utilizadas as imagens do Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por satélite (Ministério do Meio Ambiente - MMA/Ibama) e o Mapa de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros (MMA), escala 1:250.000, ano base 2002.

4.1. Classes de Uso do Solo

Para a definição das classes a serem utilizadas no modelo, trabalhos recentes de classificação do solo foram consultados. Conforme o mapeamento de Sano *et al.* [2008], o DF apresenta as seguintes classes de uso de solo: cultura agrícola, pastagem cultivada, massa d'água, vegetação nativa, e área urbana. Na escala de estudo não foram detectadas áreas de mineração e as áreas de reflorestamento são pouco significativas. A proporção de ocupação das áreas do DF para cada tipo de uso do solo é apresentada na Figura 3.

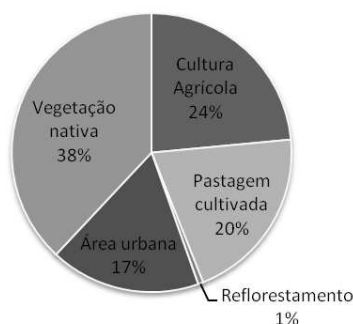


Figura 3: Proporção de áreas ocupadas pelas diferentes classes de uso da terra no DF.

De acordo com a revisão de sucessão da fronteira agrícola no Cerrado e com o apoio de especialistas, especificou-se uma máquina de estados simples e determinística para o estado de conservação do solo (Figura 4), com as classes agricultura, pecuária, urbanização, conservação e vegetação nativa. É possível explorar cenários diversos pela alteração das taxas de conversão entre os estados, caracterizando uma perspectiva tendencial (*business as usual*), conservativa ou degradativa. A transição entre os estados ocorre pelas possibilidades de uso do solo, como por exemplo a transição de vegetação nativa para o estado agricultura representando a utilização agrícola do solo.

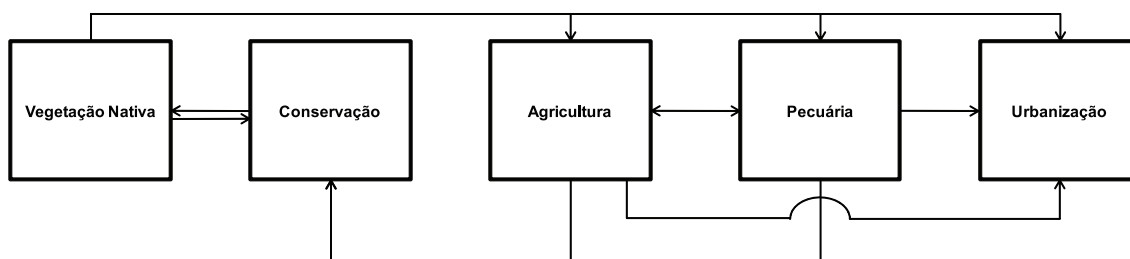


Figura 4: Máquina de estados determinística para o estado de conservação do solo.

4.2. Variáveis Proximais

A exploração do uso do solo depende de diversos fatores sociais, econômicos, geográficos e inclusive políticos. Muitos destes fatores são difíceis de serem previstos e modelados em um sistema de simulação. Porém, certas informações do ambiente podem ser levadas em consideração para criar um ambiente de simulação do uso do solo. Estas informações são comumente chamadas de variáveis proximais.

As variáveis proximais consideradas no presente trabalho foram: Ferrovia, Rodovia, Rio, Lago, Rua, Edificação e Unidade de Conservação. Para cada tipo de uso do solo foram criadas relações de estímulo, desestímulo ou neutra, para cada uma das variáveis proximais. Considera-se que Ferrovia, Rodovia, Rio, Lago, Rua e Edificação estimulam o uso antrópico de áreas situadas em suas imediações. Em outras palavras entendemos que as áreas próximas a uma rodovia, por exemplo, são mais propensas a serem ocupadas do que áreas mais distantes de rodovias.

Para se modelar a capacidade de estímulo à ocupação de cada uma dessas variáveis, as imagens que as representam foram filtradas por meio de um filtro Gaussiano isotrópico (circularmente simétrico) bidimensional $h(x, y)$, definido pelos autores e apresentado na Equação 1, onde h e σ representam o tamanho do filtro e o desvio padrão, respectivamente, sendo parâmetros que podem ser ajustados pelo usuário do sistema.

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

A Figura 5 mostra o filtro Gaussiano utilizado na geração das imagens da Figura 6 ($h_{size} = 11$ e $\sigma = 2$). A Figura 7 mostra uma parte ampliada para uma variável proximal. As regiões mais claras nas imagens representam os lugares onde existe uma maior probabilidade de ocupação da terra para uso antrópico. As áreas mais escuras, que estão circundadas por *pixels* mais claros, indicam regiões que não podem ser utilizadas durante o processo de simulação. As regiões mais escuras representam áreas que já estão ocupadas, por exemplo por estradas, edificações, ou áreas de curso de água. A variável Unidade de Conservação, mostrada na Figura 8, tem o efeito de inibir o uso antrópico. Nesse exemplo, a região em branco é uma área protegida e não pode ser ocupada.

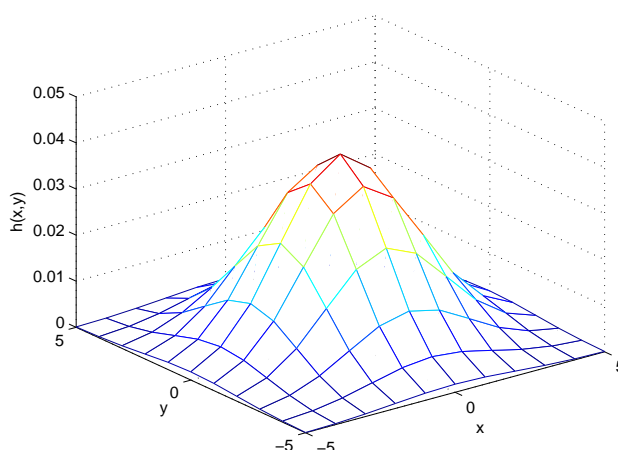


Figura 5: Filtro Gaussiano utilizado na geração das imagens mostradas nas Figuras 6 e 7.

Após terem sido geradas, as imagens filtradas são utilizadas no cômputo de uma média ponderada, de acordo com a Equação 2, onde T é o mapa resultante, M_i representa a imagem filtrada referente a variável proximal i e p_i indica quanto a variável i vai contribuir na geração do mapa T . Além disso, gerou-se um mapa auxiliar T_{aux} que

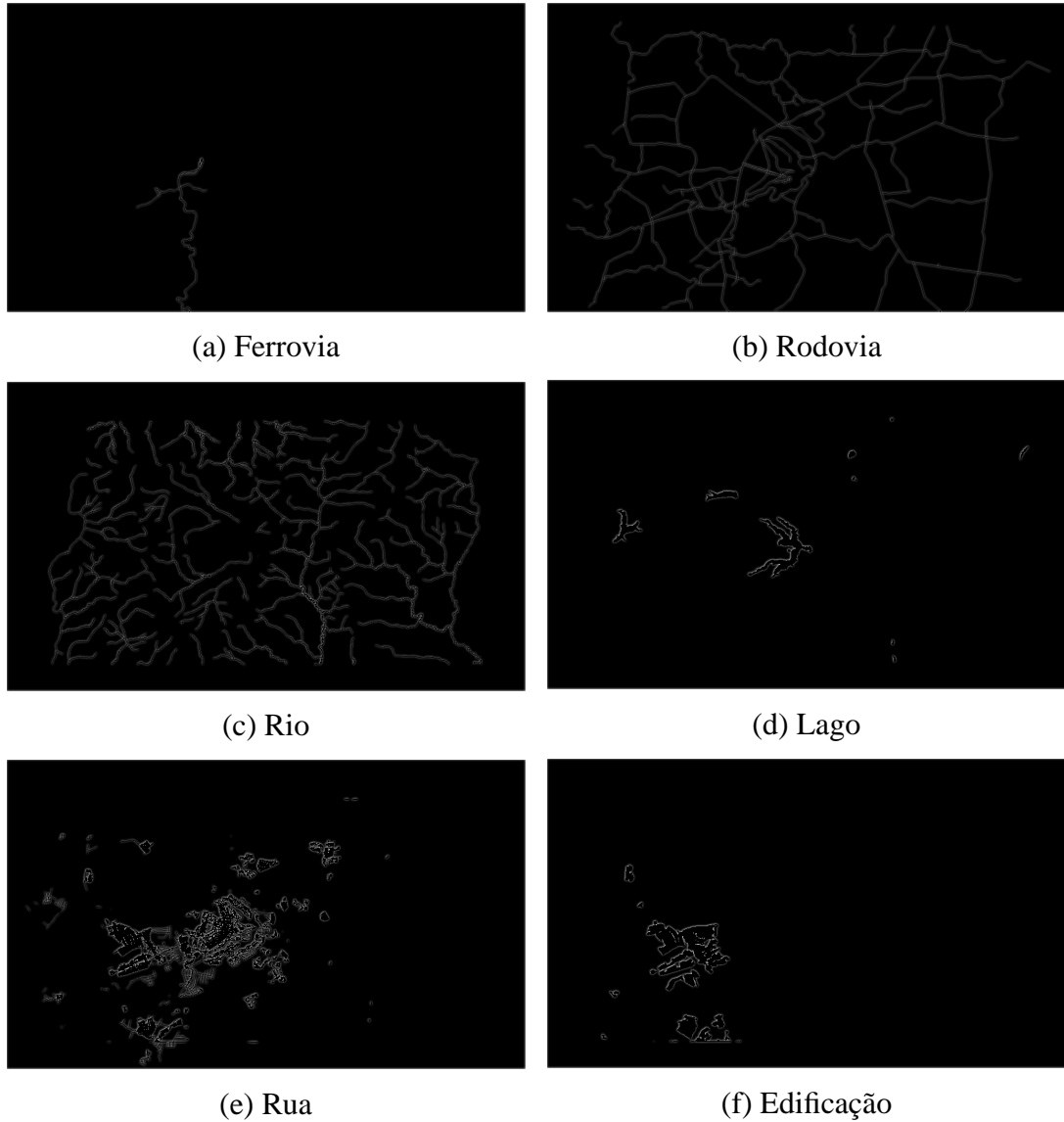


Figura 6: Variáveis proximais.

indica as regiões desabilitadas para qualquer tipo de uso, por constituírem Unidades de Conservação ou por serem áreas que já estão ocupadas. A Figura 9 mostra os mapas T e T_{aux} para o cerrado. Todos os pesos p_i foram considerados iguais a $1/6$.

$$T = \sum_{i=0}^5 M_i \cdot p_i, \quad (2)$$

A Figura 10 mostra um exemplo de como os diferentes mapas podem ser utilizados para determinar a movimentação de um agente explorador. Tomando como referência a ilustração da Figura 10 (a), considere que áreas em amarelo são áreas que já foram ou estão sendo exploradas, e áreas em verde são áreas que potencialmente poderiam ser exploradas. O círculo indica um agente explorador. Uma vez que haja a necessidade de movimentação do agente, o mapa T_{aux} , mostrado na Figura 10 (b), é consultado e as

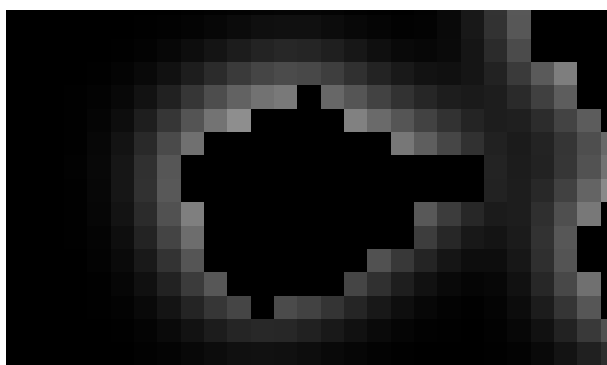


Figura 7: Parte ampliada da variável proximal *Edificações*. Segundo o que está sendo proposto, regiões mais claras estariam mais propensas a ocupação que regiões mais escuras.



Figura 8: Unidade de Conservação: inibe o uso antrópico.

células vizinhas marcadas com o valor lógico 1 são identificadas com potenciais destinos.

Note que no exemplo da Figura 10 (a) estão sendo descartadas as células que já foram exploradas (apresentadas em amarelo), ou que estão marcadas com valor lógico 0 (zero). Em seguida o mapa T é consultado para que dentre as células candidatas a destinos seja escolhida aquela que apresenta o maior potencial de atração do agente explorador. Desta forma, essa célula passa a ser a nova área em exploração.

Algumas características apresentadas para o modelo são essenciais para o entendimento das decisões arquiteturais implementadas no protótipo. A máquina de estados, explicitada na Figura 4, é utilizada na gerência da transição dos estados das células do *grid*. Necessário é ressaltar que o foco da máquina de estados utilizada nesse trabalho está na transição entre a vegetação natural e a exploração por agricultura. Já a abordagem de SMA adotada para o protótipo, se utiliza das variáveis proximais na determinação dos padrões de movimentação dos agentes e nos padrões de exploração pelo ambiente, representado pelas células do *grid*.

5. Protótipo

O protótipo da ferramenta computacional implementa o modelo descrito na Seção 4, configurando as mudanças ocorridas no tempo por meio das variáveis proximais utilizadas, bem como pela racionalidade definida para cada um dos agentes. Nossa proposta de solução considera camadas arquiteturais para a simulação, as quais são denominadas



(a) Mapa T

(b) Mapa T_{aux}

Figura 9: Mapas T e T_{aux} resultantes, utilizados como indicadores de propensão à ocupação. Em (a), regiões mais clara indicam maior propensão à exploração. Em (b) regiões mais escuras indicam impossibilidade de exploração.

layers.

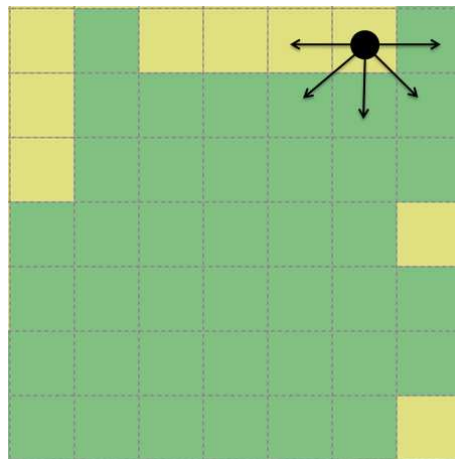
A ferramenta proposta pode ser sintetizada como um SMA híbrido de coordenação competitiva entre os agentes. Um SMA, por ser composto de vários agentes, os mesmos devem interagir para alcançar um objetivo comum do projeto. A abordagem de interação adotada para os agentes foi definida como competitiva, uma vez que os agentes de uso do solo concorrem pelo mesmo recurso (o espaço para uso do solo), dentro do *grid* de simulação e podem ter objetivos distintos e concorrentes entre eles, mas consoantes com um objetivo global de utilização dos recursos disponíveis. A abordagem híbrida se refere à comunicação e interação dos agentes, permitindo uma abordagem multiescalar, como mostrado na Figura 11.

A estrutura típica de um SMA é a abordagem *bottom-up*, ou abordagem tradicional, em que a mudança total do sistema é a soma das decisões locais de cada um dos agentes. No caso das mudanças do uso e cobertura da terra, a mudança total gerada após um passo de simulação seria o conjunto de cada decisão local tomada pelos agentes exploradores, em cada *pixel*. Outros modelos estatísticos ou econômicos implementam a abordagem *top-down*, ou seja, uma taxa de mudança pode ser determinada para a área total em estudo, e depois alocada espacialmente conforme técnicas específicas.

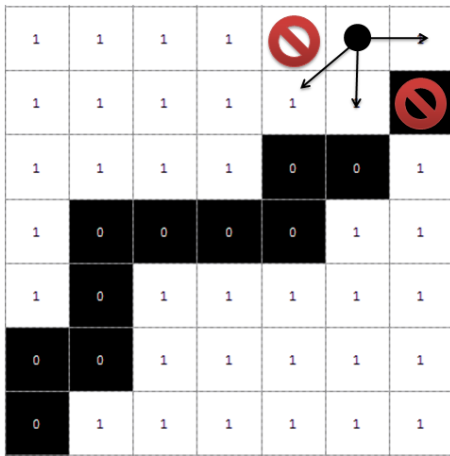
A proposta híbrida conjuga essas duas hierarquias, permitindo maior flexibilidade de análise no modelo de simulação, e representa considerável aumento na complexidade da arquitetura. Verburg *et al.* [2009] e Barnaud *et al.* [2008] apontam o equilíbrio entre as abordagens *top-down* e *bottom-up* como uma dos principais desafios de pesquisa para o estudo das mudanças no uso e na cobertura da terra, pois afirmam que só se é possível representar a dinâmica desses sistemas de maneira realista quando são consideradas as influências regionais e os intervenientes políticos (tipicamente *top-down*) agindo em conjunto com as mudanças em escala local.

5.1. Detalhamento da Infraestrutura Computacional

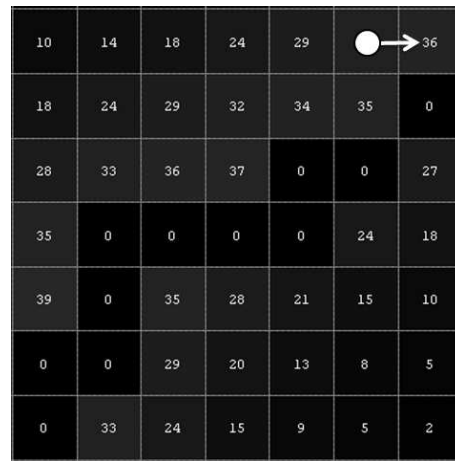
O desenvolvimento do protótipo foi realizado utilizando o *Java Agent Development Framework* (JADE), versão 4.0 (20/04/2010), o qual implementa a arquitetura proposta pela



(a)



(b)



(c)

Figura 10: Ilustração do processo de deslocamento de um agente explorador a partir do mapa de uso antrópico, mostrado em (a), e dos mapas T_{aux} e T , mostrados em (b) e (c), respectivamente.

Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) para definição de um SMA. A FIPA é uma organização pertencente ao *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, responsável por especificar padrões para o desenvolvimento de tecnologias baseadas em agentes inteligentes. O *framework JADE*, desenvolvido pela *Telecom Italia LAB (TI-LAB)*, é um *middleware* para desenvolvimento e execução de aplicações baseadas em agentes inteligentes, desenvolvido na linguagem Java. Fornece serviços de páginas brancas e amarelas, e protocolos de comunicação e interação de agentes, além de ferramentas para a mobilidade de agentes entre plataformas distribuídas [Bellifemine *et al.*, 2008].

Para os cálculos dos mapas de influência foi utilizado a ferramenta *simulink*³ do software MATLAB⁴, versão 7.10.0.499 (R2010a), exportado pela biblioteca *matlabcontrol*, a qual provê uma interface e permite que agentes JADE interajam com sistemas desenvolvidos em MATLAB. Para viabilizar a configuração do modelo pelo usuário optou-

³<http://www.mathworks.com/products/simulink/index.html>.

⁴<http://www.mathworks.com/products/matlab/>.

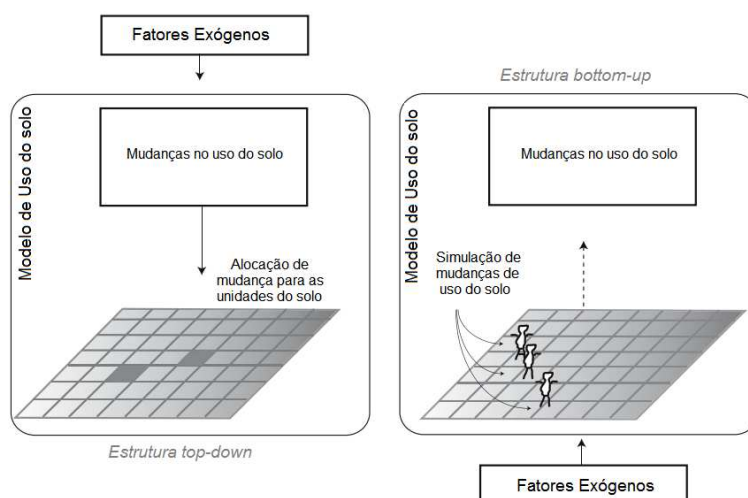


Figura 11: Representação da hierarquia na estrutura dos modelos de uso do solo (adaptado de Verburg, 2006).

se pela utilização da linguagem *Extensible Markup Language* (XML)⁵, e para o tratamento e persistência de dados o MySQL⁶ com *framework* Hibernate⁷.

A implementação do protótipo e a execução das simulações foram realizadas de maneira local. Para a execução dos testes da ferramenta proposta, foram utilizadas as dependências do Laboratório de Imagens, Sinais e Áudio (LISA) do Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Brasília, com utilização de três máquinas para tratamento das imagens na simulação:

- Máquina A - Processador Intel core 2 Duo de 1.86 GHz, memória RAM de 2GB, sistema operacional de 32 bits;
- Máquina B - Processador Intel core i5 de 2.27 GHz memória RAM de 4GB, sistema operacional de 64 bits;
- Máquina C - Processador Intel core 2 Duo de 2,20 GHz memória RAM de 2GB, sistema operacional de 32 bits.

São restrições computacionais a dependência do MATLAB e a implementação local do protótipo. Embora não façam parte do escopo da primeira versão do protótipo, são melhorias que definitivamente devem compor uma ferramenta de simulação utilizada para aplicações ambientais, que necessitam de robusta infraestrutura computacional para representar e simular a dinâmica das interações humanas e ambientais.

5.2. Proposta Arquitetural

Faz-se necessário a caracterização do Ambiente de Tarefa, proposta por Russel e Norvig [2010]. Embora o ambiente real, ou seja, o espaço geográfico sobre o qual acontecem as alterações da cobertura e uso da terra, seja parcialmente observável, estocástico, sequencial, dinâmico, contínuo, multiagente e competitivo, várias restrições são feitas para que o ambiente real se torne computável para a simulação. Para o estudo de caso em pauta, considera-se o ambiente do SMA como:

⁵<http://www.w3.org/XML/>.

⁶<http://www.mysql.com/>.

⁷<http://www.hibernate.org/>.

Tabela 2: Descrição das Classes de Agentes.

Agentes	Tipo	Qtde Instâncias	Funções
Gerente de GRID (GGRID)	Orientado a Objetivos	1	Promover interface dos comandos do usuário Ordenar início, pausa, fim dos agentes Recebe estados dos agentes para visualização Promove a visualização dos estados dos agentes p/ usuário
Gerente de Células (GC)	Orientado a Objetivos	1	Instancia a qtde de células para simulação Recebe ordens do GGRID, replica para células Recebe os estados das células, replica para GGRID
Gerente de Transformação (GT)	Orientado a Objetivos	1	Instancia a qtde de agentes exploradores necessários para a simulação Recebe ordens do GGRID e replica para os exploradores Recebe os estados dos exploradores, replica para GGRID
Célula	Reflexivo c/ registro de estado	Definido pelo usuário	Percepções e ações definidas na Tabela 3
Explorador	Reflexivo c/ registro de estado	Definido pelo usuário	Percepções e ações definidas na Tabela 3

- Parcialmente Observável: cada agente tem campo de percepção restrito à sua vizinhança;
- Determinístico: o próximo estado do ambiente é determinado pelo estado atual e pela ação executada pelo agente;
- Episódico: o tempo não é tratado de maneira contínua. São considerados passos atômicos para fins da simulação;
- Estático: o ambiente não se altera enquanto um agente está deliberando;
- Discreto: restringe as transições possíveis às definidas pela máquina de estados;
- Multiagente: é necessário um conjunto de agentes, com papéis diversos, para compor o sistema;
- Competitivo: agentes possuem interesses próprios que são concorrentes entre si.

Para a definição arquitetural da ferramenta foram propostas classes de agentes distintas, delimitando entidades responsáveis pela tomada de decisão, pela execução de ações, pelo ambiente de visualização e pela execução da simulação. Para o estudo de caso foram criadas cinco classes de agentes conforme apresentado na Tabela 2. Salienta-se que estas classes podem ser expandidas, ou novas instâncias das mesmas classes podem ser criadas, à medida que a modelagem dos diferentes comportamentos dos agentes forem sendo detectados. A abordagem de desenvolvimento de SMA é incremental, facilitando o desenvolvimento de novas funcionalidades nos agentes. Atrélada à cada uma das classes de agentes estão imagens com o domínio espacial nativo à classe, como por exemplo, o mapa das áreas urbanas associada aos agentes urbanos, formando assim um nível específico de simulação.

Os dois agentes finalísticos, ou seja, os agentes que desempenham as funções centrais na descrição da dinâmica de simulação das mudanças no uso e na cobertura da terra são os agentes Célula e Explorador. São esses dois tipos de agente que formam a base da hierarquia *bottom-up* da ferramenta de simulação proposta. Segundo a classificação definida por Russel e Norvig [2010], os agentes célula e explorador são reflexivos com registro de estado, ou seja agentes simples que percebem e agem no ambiente, onde cada agente mantém uma estrutura interna de registro de estados, que depende do histórico de suas percepções, bem como um conjunto de comportamentos pré-definidos. Ambas

Tabela 3: Descrição das características de percepção e ação dos agentes Célula e Explorador.

Tipo do Agente	Percepção	Ação
Célula	Receber ordens do GC	Informar seu estado para o GC Começar ou interromper a regeneração da vegetação Armazenar o quanto da vegetação já foi explorada Sinalizar se está ou não ocupada por um agente explorador
Explorador	Receber ordens do GT	Informar seu estado para o GT Solicitar alteração de posição para o GT Mover-se de uma célula para outra Explorar a célula Identificar se a célula já está exaurida

informações são utilizadas no processo de tomada de decisão do agente. A Tabela 3 detalha as definições de percepção e ação para esses dois tipos de agentes.

Para viabilizar a coordenação dos agentes, a cooperação e a resolução de conflitos, optou-se por uma organização em níveis hierárquicos. Nessa hierarquia, agentes de níveis mais altos possuem maior controle sobre agentes em níveis inferiores, conforme apresentado na Figura 12. Note que na camada de usuário foi projetada uma interface para permitir que a configuração do modelo e obtenção dos resultados de simulação fosse possível. Toda a configuração fornecida pelo usuário da ferramenta é traduzida em arquivos XML e carregada de forma a iniciar a ação dos agentes, associando-os à camada de simulação *layers*.

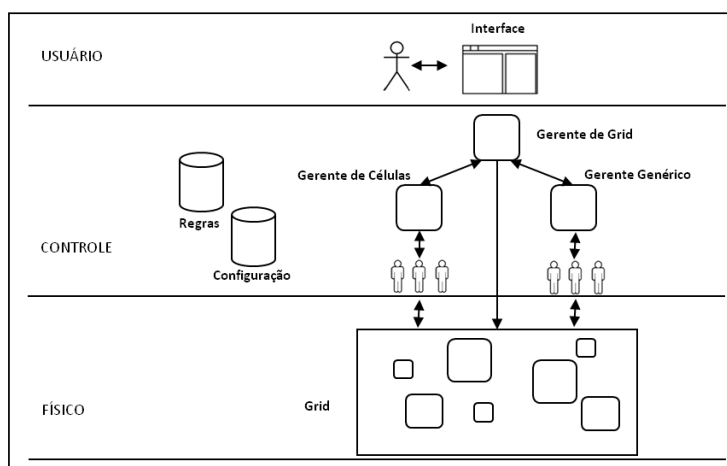


Figura 12: Proposta de arquitetura em níveis.

Através da camada de interface com o usuário, é possível configurar quais agentes farão parte da simulação, adicionando comportamentos aos agentes a partir de uma biblioteca disponível. Também é possível associar máquinas de estado específica à cada agente, a fim de definir as ações de cada agente. Além disso, regras adicionais, como diretrizes globais à simulação são disponibilizadas nessa etapa. A flexibilidade da configuração estende-se à criação do número de agentes que compõem cada classe, os quais interagirão no espaço definido pelo usuário por *layers* de simulação respectivas de cada classe.

A camada de controle se utiliza das regras e configurações definidas previamente para produzir a simulação. É nessa camada que estão os mecanismos lógicos de simulação, de sobreposição das *layers* e de armazenamento dos resultados intermediários. A camada física é responsável por carregar as imagens reais e compará-las com as imagens provenientes da simulação, calculando o *peak signal-to-noise ratio* (PSNR) entre as duas imagens. O PSNR é uma métrica de qualidade aplicada para tratamento de imagens baseada na razão máxima entre sinal-e-ruído de frames comprimidos. Normalmente quando o PSNR é alto significa que a reconstrução da imagem é de boa qualidade.

6. Resultados Experimentais

A partir da definição do modelo apresentado na Seção 4 e da aplicação dos cálculos matemáticos nas imagens definidas para o estudo de caso, bem como do desenvolvimento do protótipo descrito na Seção 5, foram executadas simulações conforme o modelo para o cenário tendencial (*business as usual*). Apesar da possibilidade de se testarem os cenários conservativo e degradativo, optou-se nos primeiros testes por manter essas variáveis constantes, para verificar o funcionamento da ferramenta.

O protótipo desenvolvido incorporou os níveis arquiteturais apresentados na Figura 12, bem como as regras e relacionamentos entre os agentes. As cadeias de comando e controle, definidos pela sistematização hierárquica dos gerentes, também foram codificadas e testadas. A simulação conseguiu abranger todos os elementos previstos no modelo, os mapas iniciais, variáveis proximais, mapas de influência e regras de comportamento. Cada interação do agente no espaço é renderizada na tela em execução (*grid* de simulação), permitindo ao usuário acompanhar o progresso da simulação ao longo do tempo.

Alguns resultados preliminares da simulação podem ser conferidos na Figura 13, a qual apresenta em detalhe a renderização de um curso d'água (rio), circundado por vegetação remanescente. O exemplo simples tem o propósito de testar todos os elementos do protótipo de SMA e verificar a implementação do modelo. Todas as variáveis proximais passaram pela filtragem gaussiana para a geração dos mapas auxiliares para a movimentação e exploração dos agentes. Todas as variáveis proximais foram carregadas para que a lógica dos agentes agricultores pudesse ser testada. Os agentes agricultores são apresentados na simulação pela cor marrom. A transformação da cobertura vegetal natural (cor verde) para uma área com antropização (cor amarela) é apresentada a partir da ação exploratória dos agentes no espaço.

Com a execução da simulação é possível verificar o atendimento às regras propostas. Entretanto, verifica-se que a calibração do modelo faz-se imprescindível para uma simulação mais complexa, adequada ao auxílio no processo de tomada de decisão. Nota-se que o tamanho do filtro gaussiano, para cada uma das variáveis proximais, tem grande influência na movimentação dos agentes pelo *grid*. Um refinamento da parametrização definida para os filtros pode aumentar a acuidade dos resultados. Após o atendimento às características propostas para o projeto, faz-se necessário a verificação da robustez do modelo. Empiricamente foi percebido que algumas variáveis são mais sensíveis que outras, mas uma formalização dessas análises faz-se necessária. Uma análise completa da sensibilidade das variáveis do modelo ainda será realizada seguindo os três passos descritos por Railsback *et al.* [2006]:



(a)

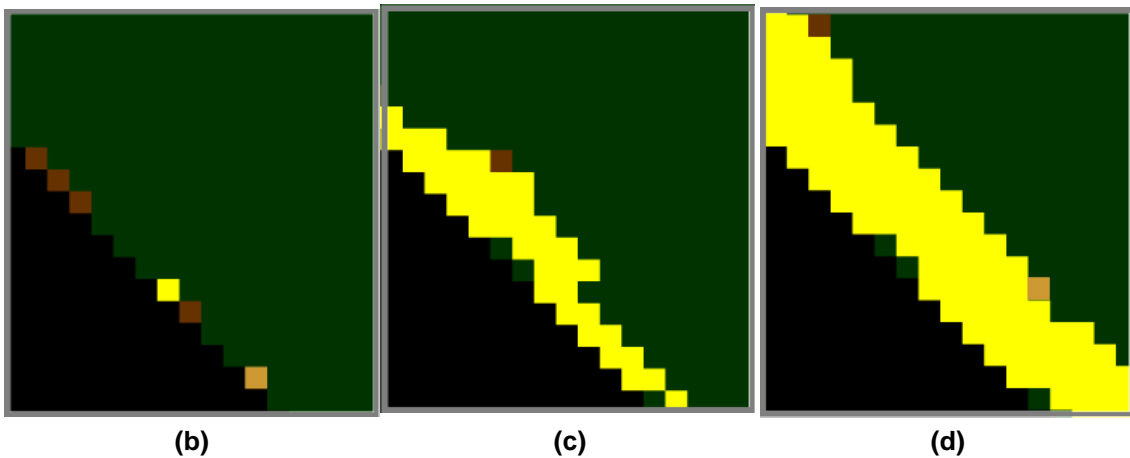


Figura 13: Interface da ferramenta para a visualização da Simulação: (a) exemplo de curso d'água (preto) cercado por vegetação remanescente (verde); (b) detalhe da figura (a) - ação dos agentes exploradores (marrom) alterando a cobertura e o uso do solo (amarelo) em 10 passos; (c) detalhe da exploração após 100 passos; (d) detalhe da exploração após 1000 passos.

1. Sensibilidade do modelo para cada parâmetro;
2. Interações entre pares de parâmetros; e
3. Reação de alternativas de controle para perturbações de parâmetros.

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

O resultado do trabalho de pesquisa apresentado neste artigo tem como principais contribuições a definição de um modelo, a definição arquitetural da ferramenta com a respectiva implementação de um protótipo e a realização de experimentos de simulação de uso do solo com dados do Bioma Cerrado. A ferramenta tem por finalidade explorar cenários alternativos e investigar hipóteses para subsidiar propostas de políticas públicas de gestão ambiental. Os estudos realizados até o momento apontam SMA como uma iniciativa emergente e promissora, destacando o papel chave da Ciência da Computação para o fortalecimento da interdisciplinaridade com as Ciências Ecológicas.

Uma ferramenta de simulação baseada em agentes contribui para a área de IA e SMA por reproduzir o conhecimento e o raciocínio de agentes heterogêneos, coordenados

de forma integrada para que problemas de gestão sejam resolvidos. A área das Ciências Ecológicas também pode explorar a dinamicidade que advém da abordagem de SMA para representar os problemas complexos, inerentes ao meio ambiente. Pela análise da dinâmica de uso e de ocupação do solo para o contexto proposto, é possível investigar a implicação de diferentes estratégias de conservação, gestão e/ou planejamento ambiental.

Com base nos estudos realizados, ressaltamos que atualmente não existe ferramenta que utilize a abordagem de SMA apresentando flexibilidade de representação espaço-temporal capaz de simular diferentes modelos de forma global. Ferramentas baseadas em outras técnicas, que apresentam essa generalidade, possuem restrições quanto à representação espacial, uma vez que consideram o espaço como sendo homogêneo. Em relação à dinamicidade, as ferramentas apresentam vizinhanças estacionárias, e quanto à representação das tomadas de decisões tipicamente humanas, elas utilizam regras de transição universais. Este projeto explora essas lacunas, ao combinar a flexibilidade dos agentes com cálculos de mapas de influência a partir de variáveis proximais, determinando comportamentos distintos e influência das adjacências no *grid* de simulação, além de ser espacialmente explícito, uma vez que simula as interações em mapas reais de forma não homogênea.

Este artigo apresentou resultados experimentais preliminares com uso da ferramenta desenvolvida. Muitas melhorias podem ser feitas no andamento desta pesquisa, principalmente considerando o refinamento dos mecanismos de raciocínio e interação dos agentes nos aspectos de ambiente, bem como na calibração e validação do modelo definido. Consideramos que os trabalhos futuros possam envolver os seguintes aspectos:

- desempenho: explorar a implementação da ferramenta de maneira distribuída, de modo a buscar melhor desempenho e tempo de resposta nas simulações efetuadas;
- racionalidade dos agentes: acrescentar comportamentos pró-ativos, com novas possibilidades de interação entre os agentes, e entre o ambiente físico, sendo possível explorar padrões de comportamento para que novos cenários sejam explorados (*business as usual*), e.g., conservativo e degradativo;
- detalhamento do modelo: agregar mais dados socioeconômicos, políticos e físicos como substrato para a ação dos agentes, enriquecendo as simulações;
- tratamento de imagem: refinar os processos de manipulação e visualização de imagens (mapas, variáveis), bem como da renderização da simulação.

Conforme apresentado, o tema desta pesquisa é essencialmente interdisciplinar integrando a Ciência da Computação com as Ciências Ecológicas, através de uma abordagem promissora de aplicação de agentes racionais, os quais podem utilizar a flexibilidade de representação espaço-temporal para simular problemas complexos e dinâmicos, inerentes as características do meio ambiente real.

Referências

- Carolina Gonçalves Abreu, Cássio Giorgio Couto Coelho Coelho, Célia Ghedini Ralha, Alexandre Zaghetto, e Bruno Macchiavello. Ferramenta de Simulação com Abordagem de Sistema Multiagente Híbrida para Gestão Ambiental. In *VII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, Salvador, 2011.
- Chetan Agarwal, Glen M Green, J Morgan Grove, Tom P Evans, and Charles M Schweik. *A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice*. United States Department of Agriculture - USDA, 2001.

- P. Arbeletche, J. Corral, J. C. Burges, H. Morales, G. Continanza, J. Couderc, V. Courdin, and P. Bommel. Dynamiques d'utilisation des terres de la pampa. application, 2008. URL <http://cormas.cirad.fr/fr/applica/dinParcel.htm>.
- C Barnaud, F Bousquet, and G Trebuil. Multi-agent simulations to explore rules for rural credit in a highland farming community of Northern Thailand. *Ecological Economics*, 66(4):615–627, July 2008.
- O. Barreteau, C. Le Page, and P. Perez. Contribution of simulation and gaming to natural resource management issues: An introduction. *Simulation & Gaming*, 38(2):185–194, June 2007.
- F Bellifemine, G Caire, A Poggi, and G Rimassa. Jade: A software framework for developing multi-agent applications. In *Software: Practice and Experience*, number 50, pages 10–21. 2008.
- J. L. Bonnefoy, C. Le Page, J. Rouchier, and F. Bousquet. Modelling spatial practices and social representations of space using multi-agents. In G. Ballot and G. Weisbuch, editors, *Application of simulation to social science*, pages 155–168. Hermès, Paris, 2000.
- F Bousquet and C Le Page. Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*, 176:313–332, 2004.
- François Bousquet, Innocent Bakam, Hubert Proton, and Christophe Le Page. Cormas: Common-pool resources and multi-agent systems. In *IEA/AIE '98*, pages 826–837. 1998.
- J Ronald Eastman. *IDRISI 32.2 - guide to GIS and image processing*. Clark Labs, Clark University, Worcester, USA, 2001.
- Carlos A Klink e Ricardo B Machado. A conservação do cerrado brasileiro. In *Megabiodiversidade*, volume 1, pages 147–155. 2005.
- Eduardo Eiji Maeda, Barnaby J.F. Clark, Petri Pellikka, and Mika Siljander. Modelling agricultural expansion in kenya's eastern arc mountains biodiversity hotspot. *Agricultural Systems*, 103(9):609–620, 2010.
- Carlos Eduardo Marinelli, Cassio Giorgio Couto Coelho, Celia Ghedini Ralha, Alexandre Zaghetto, e Bruno Macchiavello. Modelo de simulação com uso de abordagem de sma para o zoneamento de unidades de conservação da amazônia. In *VI Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*. 2010.
- N Myers, R a Mittermeier, C G Mittermeier, G a da Fonseca, and J Kent. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772):853–858, February 2000.
- S F Railsback, Paul C Cunningham, and R H Lamberson. A strategy for parameter sensitivity and uncertainty analysis of individual-based models. *Ecological Modelling*, 111(2-3):207–222, 2006. doi: 10.1016/S0304-3800(98)00120-3.
- Stuart J Russel and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: a modern approach*. Prentice Hall, 2nd edition, 2010.
- Edson Eyji Sano, Roberto Rosa, Jorge Luís Silva Brito, e Laerte Guimarães Ferreira. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do bioma cerrado. In *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, volume 43, pages 153–156. January 2008.
- Edson Eyji Sano, Roberto Rosa, Jorge Luís Silva Brito, e Laerte Guimarães Ferreira. *Mapeamento do uso do solo e cobertura vegetal - bioma cerrado: ano base 2002*. MMA/SBF, Brasília, 2010.
- Mehdi Saqalli, Charles L. Biielders, Bruno Gerarad, and Pierre Defourny. Simulating rural environmentally and socio-economically constrained multi- activity and multi-decision

- societies in a low-data context: A challenge through empirical agent-based modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13(2), 2010.
- Britaldo Silveira Soares-Filho, Gustavo Coutinho Cerqueira, e Cássio Lopes Pennachin. Dinamica: a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an amazonian colonization frontier. In *Ecological Modelling*, volume 154. 2002.
- Hamdy A Taha. *Operational Research: An Introduction*. Prentice Hall, 2006.
- Monica G Turner, Robert H Gardner, and Robert V O'Neill. *Landscape Ecology in theory and practice: pattern and process*. Springer-Verlag New York, Inc., 2001.
- Peter H Verburg. Simulating feedbacks in land use and land cover change models. In *Landscape Ecology*, volume 21, pages 1171–1183. 2006.
- Peter H Verburg, Welmoed Soepboer, A Veldkamp, Ramil Limpiada, Victoria Espaldon, and Sharifah S A Mastura. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the clue-s model. In *Environmental Management*, volume 30, pages 391–405. 2002.
- Peter H Verburg, Paul P Schot, Martin J Dijst, and A Veldkamp. Land use change modeling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61(4):309–324, December 2004.
- Peter H Verburg, Jeannette Van De Steeg, A Veldkamp, and Louise Willemen. From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 90(3):1327–1335, 2009.
- Gerhard Weiss. *Multiagent Systems: a Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, 2000.
- Michael Wooldridge. *An Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons, 2nd edition, 2009.