

Uso de Sistema Multiagente para análise da mudança no uso do solo em uma bacia hidrográfica do Brasil

Bruna S. Leitzke¹, Diana F. Adamatti¹

¹Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC)
Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – Rio Grande – RS – Brasil

brunaleitzke@hotmail.com, dianaada@gmail.com

Abstract. *Watersheds are of great importance to society. However, poor management of these regions can bring major environmental impacts. This study aims to present a proposal for a Multi-Agent System for the analysis of the consequences of land-use change in hydric system. For this, the Arroio Fragata Watershed (AFW), located in southern Brazil, was chosen. The watershed was considered like the environment of the system, which was discretized in regular square cells. Agents modify land use in each cell of the environment. And in each cycle, changes in land use and the volume of water are updated. The results indicate the consequences on the environment, and on the amount of water available in each cycle.*

Resumo. *As bacias hidrográficas possuem grande importância para a sociedade. Entretanto, a má gestão dessas regiões pode trazer grandes impactos ambientais. Este estudo visa apresentar uma proposta de Sistema Multiagente para a análise das consequências da mudança no uso do solo no sistema hídrico. Para isso, escolheu-se a Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata (BHAF), localizada no sul do Brasil. A bacia foi considerada como ambiente do sistema, sendo esse discretizado em células quadradas regulares. Os agentes modificam o uso do solo em cada célula do ambiente. E em cada ciclo, as mudanças no uso do solo, e o volume de água são atualizados. Os resultados indicam as consequências no ambiente, e na quantidade de água disponível em cada ciclo.*

1. Introdução

A gestão de uso do solo é uma área que visa organizar e planejar o manejo ideal do solo em determinada região. As mudanças no uso do solo induzidas por ações antrópicas vem interferindo gravemente no meio ambiente, refletindo no bem estar de seres vivos e na economia [Ganaie et al. 2021]. Além disso, em bacias hidrográficas a má gestão do uso do solo impacta a quantidade e qualidade de recursos hídricos, dos quais são necessários para a realização de diversas atividades, como irrigação, abastecimento público, lazer, e outros [Leitzke and Adamatti 2021].

Métodos como programação linear e não linear, algoritmo de otimização genética, teoria baseada em jogo, entre outros, vem sendo utilizados para determinar o manejo ideal de uso do solo em diversas regiões [Li et al. 2022]. Os Sistemas Multiagente (MAS) são ferramentas que facilitam a construção de modelos sobre meios complexos e dinâmicos, onde os agentes percebem o ambiente e agem sobre ele [Crooks and Heppenstall 2012]. Agentes são entidades computacionais autônomas de processamento de informações, que

atuam a partir de estímulos e sensores do ambiente [Russell and Norvig 2002]. Assim, a tomada de decisão e as interações dos agentes geram mudanças no ambiente, que afetam suas percepções e decisões [She et al. 2017]. Ao simular computacionalmente um MAS tem-se uma Simulação Baseada em Multiagente (*Multi-Agent Based Simulation* - MABS), que possibilita descrever o comportamento de sistemas complexos com múltiplos domínios [Gilbert and Troitzsch 2005]. Dessa forma, pode-se simular o comportamento da mudança no uso do solo e das interações humanas no ambiente [Parker et al. 2003].

O uso de MABS vem sendo utilizado para diferentes finalidades, dentro do campo de investigação sobre o impacto de mudanças no uso do solo. [Le Ber et al. 1998] desenvolveram SMA para simular a gestão do uso da terra em regiões agrícolas no nordeste da França. Cada classe de uso da terra foi representada por um conjunto de agentes, dos quais lutam entre si para atingir um objetivo, e buscam conquistar regiões para satisfazê-lo. [Corral et al. 2008] fizeram um estudo de caso em uma região do Uruguai, para entender e prever os efeitos das mudanças no uso da terra. A modelagem e simulação do SMA foi utilizada para explorar a evolução do sistema, onde foi considerada a relação de custo e produção sobre os usos do solo. [Yamashita and Hoshino 2018] construíram um modelo de simulação analítica baseado em SMA para analisar as mudanças de gestão em regiões agrícolas do Japão, das quais sofrem com a falta de sucessores para agricultores idosos.

Neste trabalho, é apresentado o desenvolvido e resultados de um MABS, do qual teve como intuito possibilitar um estudo inicial sobre a gestão de uso do solo em uma pequena bacia hidrográfica localizada no sul do Brasil. O modelo aqui apresentado, foi construído através da ferramenta *GIS Agent-based Modeling Architecture* (GAMA), e de dados disponíveis de vazão, e mapas de uso do solo e de sub-bacias da região. O ambiente foi discretizado em células quadradas regulares. E em cada célula foi identificado o uso do solo e a sub-bacia. A partir disso, os agentes definidos como *gestores*, modificaram o uso do solo em cada célula, em sub-bacias específicas.

Para determinar o impacto da mudança do uso do solo na região de estudo, foram definidas algumas variáveis e parâmetros que interferiam no volume de água inicial do ambiente. Em cada célula, o uso do solo recebeu um valor de consumo de água de acordo com sua classificação. O modelo foi definido com escala temporal mensal, e para cada estação do ano foi definido um valor de recuperação de água. Além disso, a quantidade de gestores, e a intenção de mudança de uso do solo por agente foram considerados variáveis. As simulações mostram que dependendo da mudança no uso do solo, o volume de água é alterado drasticamente.

Na seção seguinte, a metodologia é abordada, onde a região de estudo, a plataforma GAMA e a construção do sistema são apresentados. Os resultados e discussão estão na seção 3, onde algumas simulações são abordadas e analisadas. E na seção 4, estão as conclusões e considerações finais deste estudo.

2. Metodologia

2.1. Área de estudo

A região de estudo deste trabalho é a Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata (BHAF), localizada no extremo sul do Brasil, e com área de aproximadamente $216km^2$. A BHAF

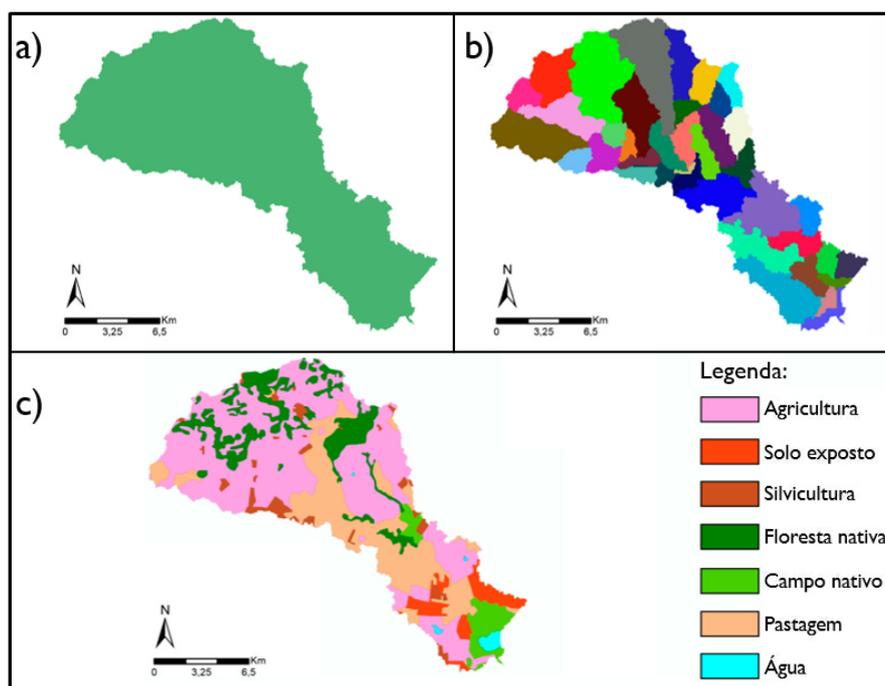


Figura 1. Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata: (a) mapa da região; (b) mapa de discretização espacial em sub-bacias; e (c) mapa de usos do solo.

influencia diretamente a Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim e do Canal São Gonçalo, da qual é uma bacia transfronteiriça entre Brasil e Uruguai, e possui grande importância socioeconômica devido ao suporte de abastecimento de água para diversas atividades.

Na Figura 1, a BHAF está ilustrada, bem como sua discretização em 39 sub-bacias e seu mapa de usos do solo. Para discretizar espacialmente a região, utilizou-se o módulo ArcLASH do modelo *Lavras Simulation of Hydrology* [Caldeira et al. 2019]. O ArcLASH é uma extensão do software ArcGIS, que é uma importante ferramenta de mapeamento e análise de dados. Os dados necessários para gerar a base espacial através do ArcLASH são o Modelo Digital de Elevação (MDE), o mapa de solos, os atributos do solo, o mapa de uso do solo, os atributos de uso do solo, a localização da seção de controle, o mapa das estações de monitoramento pluviométrico e meteorológico e o limiar para definição da rede de drenagem. Escolheu-se essa ferramenta, com o intuito e possibilidade de aprimorar o MABS futuramente. Neste trabalho, utilizou-se o mapa de uso do solo obtido do portal de Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais, disponibilizado em [IBGE Homepage 2020]. O percentual de cada classe de uso em relação a BHAF é: 50,1% agricultura; 4,5% solo exposto; 3,7% silvicultura; 13,2% floresta nativa; 4,8% campo nativo; 22,9% pastagem; e 0,8% água. Assim, a agricultura e a pastagem representam as classe de maior predominância.

2.2. Ferramenta GAMA

Para o desenvolvimento da modelagem e simulação do SMA neste trabalho, escolheu-se a ferramenta GAMA [Taillandier et al. 2019]. GAMA é uma plataforma baseada na ferramenta Eclipse, da qual é um ambiente de desenvolvimento integrado. Além disso, possui linguagem de programação própria chamada Gama Modeling Language (GAML),

que é codificada através do ambiente computacional Java. A plataforma disponibiliza vários modelos em sua biblioteca, tutoriais de utilização e uma documentação online completa.

Diferentes tipos de conjuntos de dados podem ser utilizados para a construção de MABS no GAMA. A ferramenta possibilita incluir dados de sistema de informação geográfica (*Geographic Information System - GIS*), ou seja, armazena a geometria e os atributos dos dados terrestres projetados cartograficamente. O ambiente de simulação da ferramenta pode ser definido de diferentes formas, como um ambiente 2D, 3D, ou em forma gráfica. Ao longo das simulações, cada agente pode ser inspecionado, e parâmetros podem ser modificados. GAMA vêm sendo utilizada para modelar e simular sistemas multiagente no contexto de diferentes tipos de problemas, como nos trabalhos de [Gaudou et al. 2014], [Farias et al. 2020], [Vicario et al. 2020], e [Mariano and Alves 2020].

2.3. Desenvolvimento do MABS

O MABS desenvolvido e apresentado neste trabalho, tem como principal objetivo simular as mudanças no uso do solo por cada agentes, e o impacto no ambiente. A verificação do modelo foi realizada em cada etapa de definição e implementação das regras do ambiente e dos agentes. O sistema contém como ambiente a região da BHAF, sua subdivisão em 39 sub-bacias e os usos do solo. O ambiente é dividido em células quadradas, onde as dimensões das células podem ser modificadas antes do início da simulação através do parâmetro *Dimensions_of_the_cells*. Entretanto, neste trabalho as células representam 300 metros de comprimento, gerando uma malha com 2574 grids ocupados. Essa dimensão da célula foi escolhida por dois motivos. A base de dados foi gerada a partir do MDE com espaçamento de 30m, do qual foi obtido através da plataforma *U.S. Geological Survey*¹. Assim, para este trabalho buscou-se uma aproximação da discretização espacial dos dados e do ambiente do SMA. Com uma malha de grids de espaçamento de 300m, o MABS apresentou simulações com tempo computacional e processamento eficientes. Isso não ocorreu com dimensões menores para as células.

A quantidade inicial de água no ambiente foi definida como um volume de água (*vol_water*) com valor 3000 (representando $3000 \times 10^7 L$). Essa quantidade foi baseada em dados de vazão de uma estação fluviométrica da BHAF, que são disponibilizados pelo portal Hidroweb². A partir dos dados de vazão, utilizou-se a relação de vazão volumétrica para converter os dados em volume, e definir um valor inicial para a região. Com exceção do uso água, cada uso do solo recebeu um valor referente ao consumo de água no grid em que está inserido (ver Tabela 1). Além disso, as células que possuem mesmo uso do solo são somadas. Considerando as células de 300m, na Tabela 1 tem-se as quantidades de células por uso do solo, e os consumos totais de água.

A Figura 2 apresenta a interface de simulação, onde tem-se o ambiente, os parâmetros, 5 gestores e a malha de grids. A quantidade de agentes pode variar de 1 a 10, a partir do parâmetro *Number_of_managers*. Os agentes representam entidades ou órgãos responsáveis pelo manejo do uso do solo na região. Como este é um estudo inicial, optou-se por definir uma lista de sub-bacias para cada gestor, e um atributo de

¹<https://www.usgs.gov/>

²<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>

Tabela 1. Consumo de água por uso do solo em cada célula.

Uso do solo	Consumo de água	Número de células	Consumo total inicial
Agricultura	1.5	1287	1930.5
Solo exposto	1.2	125	150
Silvicultura	1.0	111	111
Floresta nativa	0.5	325	162.5
Campo nativo	0.3	130	39
Pastagem	0.8	576	460.8
Água	0	20	0
Valores totais:	—	2574	2853.8

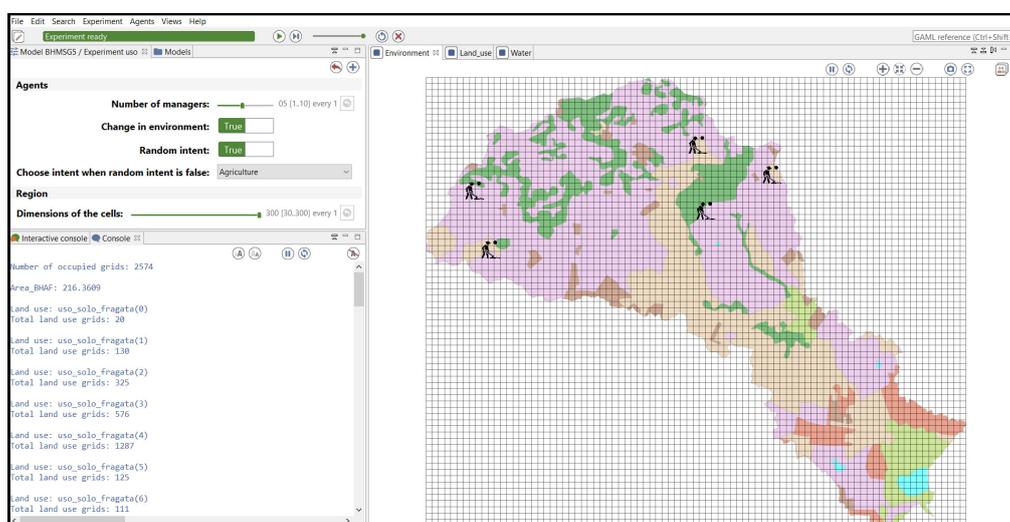


Figura 2. Interface do SMA em GAMA.

mudança de uso do solo chamado *intenção*. Dessa forma, cada gestor é responsável por mudar o uso do solo em determinadas sub-bacias, conforme sua intenção de mudança. A intenção dos agentes pode ser interpretada como uma meta a ser alcançada, de forma que os agentes modifiquem o uso do solo em quantas células forem possíveis.

A lista de sub-bacias para cada gestor é determinada de forma ordenada. Primeiramente, é dividido o número total de sub-bacias (39) pelo número de gestores, que varia conforme o parâmetro *Number_of_managers*. Esse resultado indica a quantidade aproximada de sub-bacias que cada gestor será responsável. As sub-bacias e os gestores são identificados por números inteiros fixos. Assim, as primeiras sub-bacias serão vinculadas ao primeiro gestor, as sub-bacias seguintes ao segundo gestor, e assim por diante. Dessa forma, todas as sub-bacias terão um gestor responsável e poderão sofrer mudanças no uso do solo. Ao iniciar a simulação, os gestores são posicionados de forma aleatória, em uma de suas respectivas sub-bacias. Os gestores possuem duas ações, que são: se mover; e mudar o uso do solo. Os agentes podem se mover por toda a BHAF, possibilitando o acesso a todas as suas sub-bacias. Para isso, é definida a ação *wander* do GAMA, onde são consideradas as variáveis de velocidade (igual a 100), e amplitude de visão (45°).

A mudança no uso do solo pode ocorrer em todas as células do grid sobre a BHAF. Entretanto, os agentes podem modificar o uso do solo apenas nas suas respectivas sub-

bacias, conforme sua intenção. A intenção de cada gestor é a mudança de uso do solo desejável. Dentre os usos do solo, a intenção é estabelecida entre agricultura, solo exposto, silvicultura ou pastagem. Essa escolha deu-se com o objetivo de analisar o impacto de mudanças de uso do solo que geram valores mais lucrativos na vida real. Por esse motivo, os usos floresta nativa, campo nativo e água não são definidos como intenção dos agentes.

Cada agente modifica as células das suas sub-bacias alterando o uso do solo conforme a *intention*. Esse atributo pode ser determinado de forma randômica ou não. Quando o parâmetro *Random_intent* é verdadeiro, para cada agente um dos 4 usos do solo é definido de forma randômica. Quando é falsa, a intenção que será atribuída a todos os agentes é escolhida antes da simulação.

No ambiente são definidos o volume de água total, e uma taxa de recuperação da água por estação do ano. Na instância dos dados, tem-se um volume de água no ambiente, calculado a partir do volume de água inicial, descontado o consumo. A escala temporal foi definida como mensal. Assim, quando a simulação inicia, cada ciclo equivale a um mês. A cada ciclo, cada agente modifica o uso do solo em no máximo uma célula, e o volume de água é atualizado conforme a Eq. 1, onde n é o mês de referência, V é o volume de água disponível no ambiente, W é a soma dos consumos de água em cada célula e S é a taxa de recuperação de água.

$$\begin{cases} V_n = V_{n-1} - W_{n-1} + S_n, \\ V_0 = 3000, \quad W_0 = 2853.8. \end{cases} \quad (1)$$

Além disso, o ambiente atualiza a estação do ano, que ocorre de 3 em 3 ciclos, e inicia no verão. Assim, a taxa de recuperação de água (S) é atualizada conforme a estação do ano, correspondendo a aproximadamente: 2650.99 no verão, 2945.99 no outono, 3035.99 no inverno, e 2785.99 na primavera. Esses parâmetros foram calibrados a partir de testes durante as simulações, de forma que o sistema fosse estável quando não houvesse mudança no uso do solo. Para gerar este estudo, inseriu-se a opção de *Change_in_environment* que, quando é falsa, não permite que os agentes modifiquem o ambiente. Esta estabilidade não condiz com a realidade quando não há mudança no uso do solo. Essa análise foi apenas para calibrar os parâmetros de recuperação de água, quando o sistema é estável.

3. Resultados

Diante do sistema desenvolvido e apresentado, alguns cenários foram definidos para gerar discussões e analisar o MABS. Neste trabalho, um cenário foi analisado, considerando 5 gestores, e a intenção dos agentes definida como randômica, onde foram realizadas 10 simulações, com 10.000 ciclos (meses) ou mais. Esse número de ciclos foi escolhido para que fosse possível observar o comportamento do ambiente com grande mudança no uso do solo. Além disso, foram verificados possíveis casos de discrepâncias nos resultados. No entanto, entende-se que este número de ciclos não pode ser considerado realista considerando uma escala de tempo mensal. As simulações podem ser realizadas com um número menor de ciclos, pois na maioria dos cenários o comportamento do ambiente se define entre 500 e 1000 ciclos. Na próxima seção estão alguns resultados sobre o cenário definido.

Nas 10 simulações realizadas, observou-se as mudanças totais em cada uso do solo, e o impacto no volume de água do ambiente. As intenções dos agentes mostraram que dependendo da forma como o ambiente é modificado, o volume de água não se recupera, sendo devastador para a região. Em outros casos, o volume de água passa a ser alto, o que também poderia trazer graves consequências para o ambiente.

Na Tabela 2, tem-se as intenções definida em cada cenário e o volume de água total aproximado ao final da simulação, onde P representa o uso do solo pastagem, A é o uso agricultura, E é o uso solo exposto e S é o uso silvicultura.

Tabela 2. Resultados em cada simulação do cenário.

Simulação	Intenções	Volume de água final
01	P P P A E	250.000
02	P P A E S	-630.000
03	P A S S S	430.000
04	P A S S S	670.000
05	P P A E S	345.000
06	P A E S S	375.000
07	P E E E S	-195.000
08	P P A E E	-520.000
09	P A A S S	-320.000
10	P A E S S	250.000

A cada ciclo, os agentes podem modificar no máximo uma célula contida em alguma das suas próprias sub-bacias, mas não necessariamente é realizada tal mudança. Além disso, os agentes são inicialmente posicionados em alguma das suas sub-bacias, não sendo considerada uma posição fixa. Esses dois fatores interferem na mudança total do ambiente, que varia conforme a possibilidade, quantidade e tipo de uso do solo modificado. Dessa forma, os resultados mostram que o impacto no ambiente depende da intenção de mudança, e também do total de mudança em cada uso do solo. Isso pode ser observado na Figura 3, onde tem-se as mesmas intenções de mudança (pastagem (2 agentes), agricultura (1 agente), solo exposto (1 agente) e silvicultura (1 agente)). Na simulação 02, as maiores mudanças ocorrem para agricultura e solo exposto. Por esses dois usos do solo serem os que mais consomem água (Tabela 1), a quantidade final de água no ambiente diminui drasticamente. Já na simulação 05, a quantidade de água aumenta, pois a maior mudança ocorre para pastagem, que é considerado o uso com menor consumo de água no sistema.

Nas simulações 03 e 05, o ambiente sofreu uma queda no volume de água, conforme a Figura 4. Entretanto ambos os ambientes se recuperaram, conforme a necessidade de consumo de água das mudanças no uso do solo envolvidas. Isso indica a possibilidade de obter um ambiente estabilizado, conforme o equilíbrio do consumo de água entre os usos do solo.

A simulação que obteve maior mudança no uso do solo foi a terceira, com cerca de 980 células modificadas, seguido da sétima simulação, com cerca de 810 células modificadas. Na Figura 5 pode-se observar os ambientes finais dessas duas simulações. Já as simulações que geraram maiores impactos no volume de água foram a segunda e a quarta,

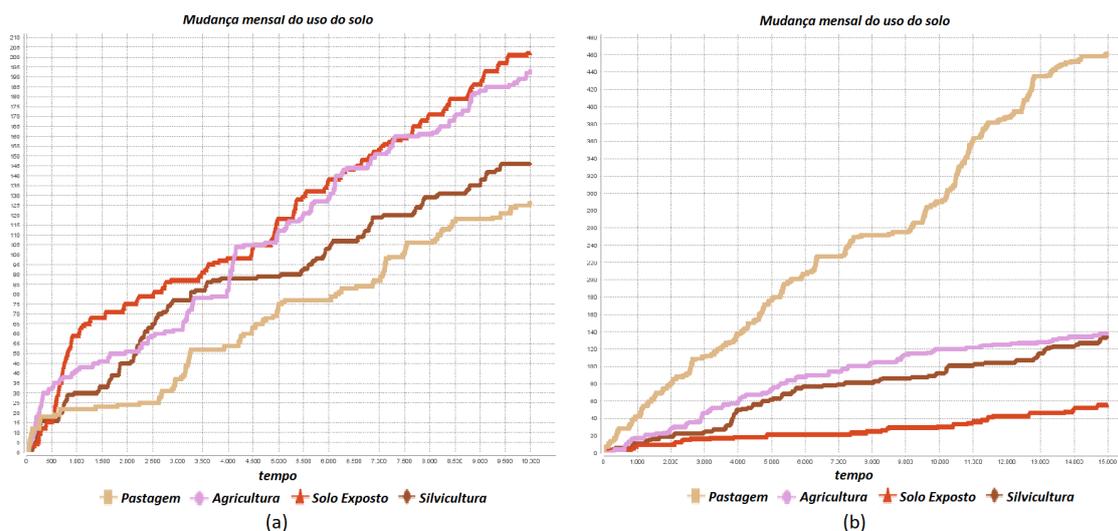


Figura 3. Mudança no uso do solo na: (a) simulação 02 e (b) simulação 05.

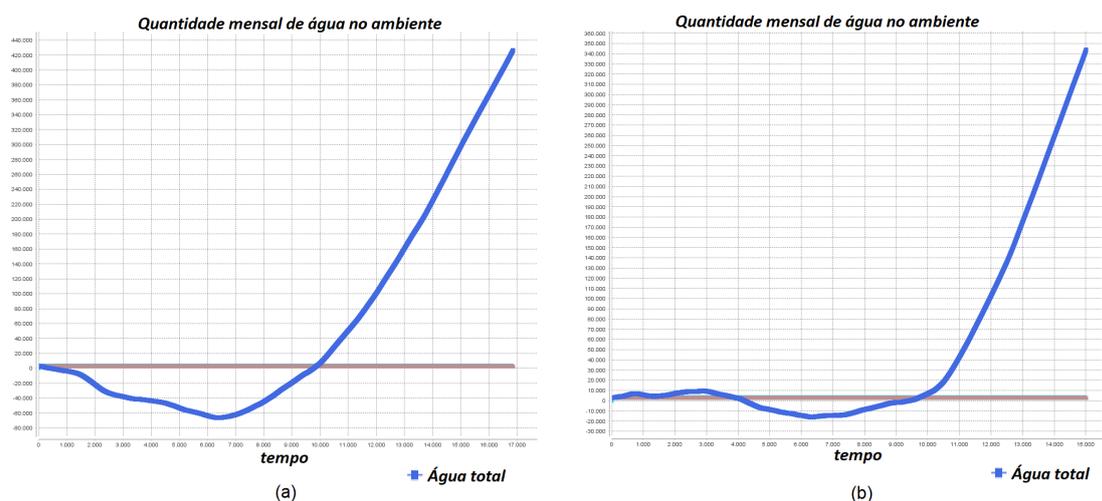


Figura 4. Volume total de água na: (a) simulação 03 e (b) simulação 05.

com aproximadamente 670 e 770 células modificadas, respectivamente. Nesse sentido, pode-se verificar que as maiores mudanças no ambiente não necessariamente foram as que geraram maiores consequências no volume de água total do ambiente.

Os resultados mostraram que o MABS desenvolvido cumpriu o objetivo, que era de simular a mudança no uso do solo e o impacto no ambiente. Na maioria dos casos, quando as células foram modificadas em maior quantidade para usos de agricultura ou solo exposto, o volume de água foi decrescente e não se recuperou. Em contrapartida, quando as maiores mudanças foram para pastagem ou silvicultura, o sistema teve uma tendência em diminuir o consumo e aumentar o volume de água. Essas análises mostram que o sistema teve bons resultados considerando o MABS desenvolvido e suas regras. Na próxima seção, algumas conclusões e trabalhos futuros são apresentados, onde são comentados alguns desafios e propostas de melhorias no modelo.

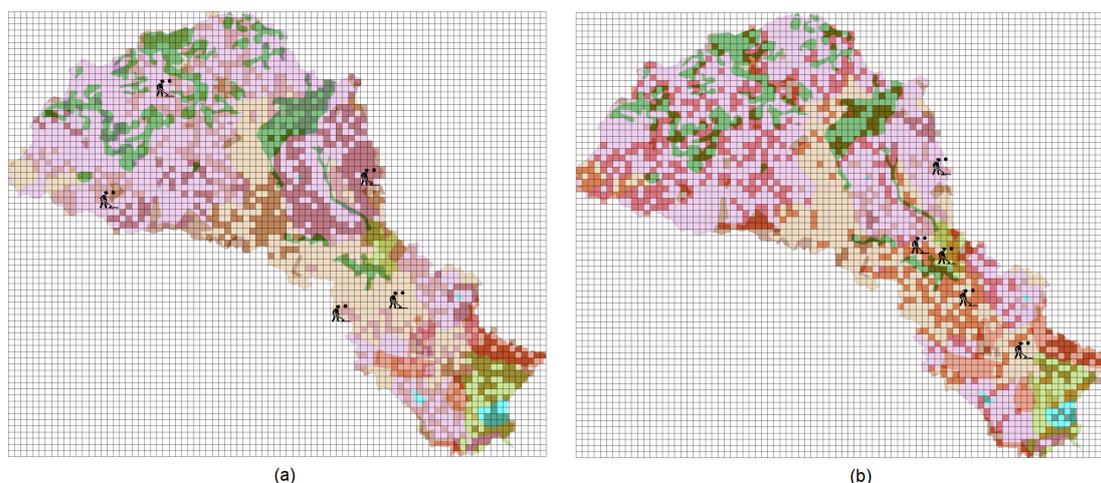


Figura 5. Ambiente final na: (a) simulação 03 e (b) simulação 07.

4. Considerações finais

Este trabalho apresentou um estudo sobre o manejo de uso do solo na BHAF utilizando MABS. O modelo foi desenvolvido e simulado na plataforma GAMA, a partir da qual foi possível implementar os dados da região de estudo. Algumas simulações foram realizadas e analisadas, considerando 5 agentes com intenções randômicas. Para verificar os resultados, foram analisados os gráficos, as mudanças de uso do solo envolvidas e as respectivas quantidades finais de água no ambiente.

Através das simulações das mudanças no ambiente foi possível visualizar as mudanças do uso do solo a cada ciclo. Além disso, os gráficos apresentaram os resultados do volume de água total no ambiente e das quantidades finais de cada uso do solo. Dessa forma, o MABS em GAMA possibilitou um estudo inicial, que futuramente poderá servir como ferramenta de apoio a tomada de decisão sobre o manejo do uso do solo. Os resultados sobre as regras do sistema e dos agentes foram satisfatórios, e o ambiente foi modificado conforme o esperado. No entanto, algumas dificuldades foram enfrentadas durante o desenvolvimento e simulação do modelo, como a determinação dos parâmetros, o custo computacional, e a validação.

Os dados do modelo, como volume de água e taxa de recuperação de água, foram baseados em dados reais. Entretanto, os valores foram ajustados para que o modelo fosse melhor calibrado. E ainda, as taxas sazonais de recuperação de água foram definidas como valores constantes. Em trabalhos futuros, busca-se desenvolver uma ferramenta que simule de forma mais efetiva o comportamento hidrológico do modelo. Para isso, pretende-se acoplar o MABS apresentado neste trabalho a um modelo hidrológico, do qual simulará o comportamento dos processos hidrológicos envolvidos na região.

Outro desafio enfrentado foi o custo computacional do modelo. A simulação mostrou-se rápida para simulações de até 10.000 ciclos. Porém, em alguns casos em que as simulações tiveram mais ciclos, alguns gráficos não foram gerados. Futuramente, pretende-se simular a mudança de uso da terra em todo o ambiente, determinando o volume de água ao final da simulação e o tempo de execução. Além disso, estender o modelo para bacias hidrográficas com áreas maiores, com o intuito de explorar outras importantes regiões de captação de água. Para isso, serão considerados mais dados, regras e

informações no sistema.

Neste trabalho, os agentes interagiram apenas com o ambiente. Com isso, foi possível explorar a divisão das sub-bacias por agentes, o número de gestores, a mudança no uso do solo em cada célula e a mudança no ambiente de acordo com as variáveis envolvidas. No entanto, é importante que em trabalhos futuros os agentes se comuniquem e cooperem para atingir seus objetivos. Dessa forma, os agentes poderão agir e tomar decisões acerca do manejo do uso do solo. Algumas características podem ser apresentadas aos gestores, como taxa de produção, custo por produção e possibilidade de modificação do uso do solo em sub-bacias de gestores vizinhos. Dessa forma, o sistema teria regras mais sólidas e mais próximas da realidade. Além disso, com o intuito de validar o modelo, pretende-se analisar tendências de mudança no uso do solo ao longo dos últimos anos. Com isso, os agentes terão intenções que seguem as tendências em regiões específicas da BHAF. A partir disso, outros estudos podem ser explorados.

Referências

- Caldeira, T. L., Mello, C. R., Beskow, S., Timm, L. C., and Viola, M. R. (2019). Lash hydrological model: An analysis focused on spatial discretization. *CATENA*, 173:183 – 193.
- Corral, J., Arbeletche, P., Burges, J. C., Morales, H., Continanza, G., Couderc, J., Courdin, V., and Bommel, P. (2008). Multi-agent systems applied to land use and social changes in rio de la plata basin (south america): 8th european ifsa symposium, 6-10 july 2008, clermont-ferrand.
- Crooks, A. T. and Heppenstall, A. J. (2012). Introduction to agent-based modelling. In Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M., and Batty, M., editors, *Agent-Based Models of Geographical Systems*, pages 85–105. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Farias, G., Leitzke, B., Born, M., Aguiar, M., and Adamatti, D. (2020). Water resources analysis: An approach based on agent-based modeling. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, 27(2):81–95.
- Ganaie, T. A., Jamal, S., and Ahmad, W. S. (2021). Changing land use/land cover patterns and growing human population in wular catchment of kashmir valley, india. *GeoJournal*, 86(4):1589–1606.
- Gaudou, B., Sibertin-Blanc, C., Thérond, O., Amblard, F., Auda, Y., Arcangeli, J.-P., Balestrat, M., Charron-Moirez, M.-H., Gondet, E., Hong, Y., Lardy, R., Louail, T., Mayor, E., Panzoli, D., Sauvage, S., Sanchez-Perez, J., Taillandier, P., Nguyen, V. B., Vavasseur, M., and Mazzega, P. (2014). The maelia multi-agent platform for integrated assessment of low-water management issues. In Alam, S. J. and Dyke Parunak, H. V., editors, *International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation (MABS 2013)*, volume 8235, pages 85–110. Springer, Lecture Notes in Computer.
- Gilbert, N. and Troitzsch, K. (2005). *Simulation for the social scientist*. Buckingham: Open University Press.
- IBGE Homepage (2020). Soil map of sheet SI.22 - Lagoa Mirim. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Last accessed 20 Jan 2020.

- Le Ber, F., Chevrier, V., and Dury, A. (1998). A multi-agent system for the simulation of land use organization. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(5):169–174. 3rd IFAC Workshop on Artificial Intelligence in Agriculture, Makuhari, Japan, 24-26 April 1998.
- Leitzke, B. and Adamatti, D. (2021). Multiagent system and rainfall-runoff model in hydrological problems: A systematic literature review. *Water*, 13(24).
- Li, M., Cao, X., Liu, D., Fu, Q., Li, T., and Shang, R. (2022). Sustainable management of agricultural water and land resources under changing climate and socio-economic conditions: A multi-dimensional optimization approach. *Agricultural Water Management*, 259:107235.
- Mariano, D. J. K. and Alves, C. M. A. (2020). The application of role-playing games and agent-based modelling to the collaborative water management in peri-urban communities. *RBRH*, 25.
- Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Hoffmann, M. J., and Deadman, P. (2003). Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2):314–337.
- Russell, S. and Norvig, P. (2002). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. New Jersey: Prentice Hall.
- She, J., Guan, Z., Cai, F., Pu, L., Tan, J., and Chen, T. (2017). Simulation of land use changes in a coastal reclaimed area with dynamic shorelines. *Sustainability*, 9(3).
- Taillandier, P., Gaudou, B., Grignard, A., Huynh, Q.-N., Marilleau, N., Caillou, P., Philippon, D., and Drogoul, A. (2019). Building, composing and experimenting complex spatial models with the gama platform. *Geoinformatica*, 23(2):299–322.
- Vicario, S. A., Mazzoleni, M., Bhamidipati, S., Gharesifard, M., Ridolfi, E., Pandolfo, C., and Alfonso, L. (2020). Unravelling the influence of human behaviour on reducing casualties during flood evacuation. *Hydrological Sciences Journal*, 65(14):2359–2375.
- Yamashita, R. and Hoshino, S. (2018). Development of an agent-based model for estimation of agricultural land preservation in rural japan. *Agricultural Systems*, 164:264–276.